

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки: 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»
 Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование режимов работы источника питания CuBr -лазера с согласующим импульсным автотрансформатором

УДК 621.373.826.038.823:621.311.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рахимжанов Асхат Темирбулатович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения материаловедения, с.н.с. ИОА СО РАН	Тригуб Максим Викторович	Кандидат технических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук ШБИП	Старикова Екатерина Васильевна	к.ф.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения контроля и диагностики ИШНКБ	Ахмеджанов Рафик. Равильевич.	д.б.н.		

По разделу «Экспериментальная часть»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. ЛКЭ ИОА СО РАН	Троицкий Владимир Олегович	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

Томск – 2018 г

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения
Универсальные компетенции	
P1	Способность <i>совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	Способность <i>использовать иностранный язык в профессиональной сфере</i> .
P3	Способность применять на практике <i>навыки и умения в организации</i> научно-исследовательских и производственных работ, в <i>управлении</i> коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности
P4	Способность использовать методологические основы <i>научного познания и творчества</i> , научную информацию в развитии отрасли, навыки проведения работ с использованием <i>современных информационных технологий</i> ; синтезировать и критически резюмировать информацию.
Профессиональные компетенции	
P5	Способность применять <i>углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания</i> в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Способность <i>ставить и решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности
P7	Способность выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Способность выполнять инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Способность проводить <i>техничко-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Способность проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.
P11	Способность осваивать <i>новое</i> электроэнергетическое и электротехническое <i>оборудование</i> ; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Способность разрабатывать <i>рабочую проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; <i>составлять оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки: 13.04.02 «Электротехника и электротехника»
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Рахимжанову Асхату Темирбулатовичу

Тема работы:

**Исследование режимов работы источника питания CuBr -лазера с согласующим
 импульсным автотрансформатором**

Утверждена приказом директора (дата, номер) № 1799/с от 15.03.2018

Срок сдачи студентом выполненной работы: 09 июня 2018 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.

Объектом исследования является схема накачки CuBr – лазера с использованием кабельного импульсного автотрансформатора и обостряющим конденсатором. Составные части импульсного кабельного автотрансформатора: Сердечник, набранный из 8 колец Феррита типа 2000 НМ Типоразмер которых 100х60х15 мм; Радиочастотный кабель типа РК -50-7-11 оплетка которого является первичной обмоткой, а жила – вторичной. Обострительный конденсатор представлен конденсаторами типа КВИ, емкость которого менялась от 100 до 200 пФ. В качестве коммутатора использовался тиратрон типа ТГИ1-1000/25. Частота следования импульсов возбуждения варьировалась от 7 до 8 кГц. Параметры ГРТ: длина активной зоны – 60 см, диаметр – 2,5 см

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> – Литературный обзор (Лазеры на парах металлов); – Кабельный импульсный трансформатор (история создания, конструкция, необходимые характеристики, согласование с нагрузкой); – Расчет параметров кабельного импульсного автотрансформатора. (схема соединения обмоток, общий вид, выбор материалов для изготовления, расчет необходимых параметров, расчет потерь в сердечнике автотрансформатора); – Проведение экспериментов со схемой накачки лазера с кабельным импульсным автотрансформатором и обостряющим конденсатором и со схемой прямого разряда рабочей емкости на газоразрядную трубку. (выбор оптимальной емкости обостряющего конденсатора, влияние давления в трубке на энергетические характеристики лазера); – Заключение по работе.
Перечень графического материала	Презентация в Microsoft PowerPoint

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Старикова Екатерина Васильевна
Социальная ответственность	Ахмеджанов Рафик.Равильевич.
Разделы, выполненные на иностранном языке	Квашнина Ольга Сергеевна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: Глава 2. Кабельный импульсный трансформатор

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22 января 2018 г.
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, н.с. ИОА СО РАН	Тригуб Максим Викторович	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рахимжанов Асхат Темирбулатович		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
 высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки: 13.04.02 «Электротехника и электротехника»
 Уровень образования: магистр
 Отделение материаловедения
 Период выполнения: 2017/2018 учебный год

Форма представления работы:

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08 июня 2018 г.
--	-----------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
07.11.2017	Обзор литературы по теме исследования	20
12.02.2018	Разработка макета импульсного автотрансформатора и проведение необходимых расчетов	30
28.03.2018	Исследование схемы накачки лазера с импульсным автотрансформатором и обостряющим конденсатором	30
05.05.2018	Финансовый менеджмент	5
11.05.2018	Социальная ответственность	5
15.05.2018	Разделы, выполненные на иностранном языке	10
		Сумма: 100 баллов

Составил руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, н.с. ИОА СО РАН	Тригуб Максим Викторович	Кандидат технических наук		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Техника и физика высоких напряжений	Жгун Дмитрий Владимирович	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 145 с., 51 рис., 31 табл., 48 источников, 1 прил. Ключевые слова: ИМПУЛЬСНЫЙ КАБЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР (АВТОТРАНСФОРМАТОР), СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, АКТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, ЛАЗЕР НА ПАРАХ БРОМИДА МЕДИ, ОБОСТРЯЮЩИЙ КОНДЕНСАТОР, ИСТОЧНИК НАКАЧКИ, ЧАСТОТА СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ.

В процессе исследования проводились: обзор источников литературы, существующие аналоги и их применение в схемах накачки лазера, разработка компьютерной модели схемы накачки с кабельным импульсным автотрансформатором, разработка макета кабельного импульсного автотрансформатора, апробация и доработка разработанного макета, анализ полученных данных, экспериментальные исследования влияния давления буферного газа на характеристики импульса, исследование влияния ИКТ и обостряющего конденсатора на выходные параметры лазерного излучения, анализ ресурсоэффективности и ресурсосбережения, рассмотрение и анализ вопросов производственной безопасности.

В результате работы был разработан макет кабельного импульсного автотрансформатора, соответствующий техническому заданию. В работе представлены осциллограммы работы системы. Проведены эксперименты по включению трансформатора в схему накачки и описаны полученные результаты.

Степень внедрения: лабораторный макет.

Область применения: усовершенствование схемы накачки лазеров на парах металлов с целью повышения КПД и улучшения выходных характеристик излучения.

Abstract

Graduation qualification work includes 145 pages, 51 figures, 31 tables, 48 references, 1 appendix. Keywords: COAXIAL CABLE AUTOTRANSFORMER, CONTROL SYSTEM, ACTIVE OPTICAL SYSTEM, COPPER BROMIDE VAPOR LASER, PEAKING CAPACITOR, PUMPING SOURCE, PULSE FREQUENCY REPETITION.

In the course of the research, the review of literature, existing analogues and their application in laser pumping schemes, design of a computer model of the pump scheme with a cable pulse autotransformer, design of a cable pulse autotransformer layout, testing and development of the layout, analysis of the obtained data, experimental studies on the influence of buffer gas pressure on the pulse characteristics, the study of the PCT influence and an peaking capacitor on the output parameters of laser radiation, analysis of resource efficiency and resource saving, consideration and analysis of issues of industrial safety were carried out.

As a result, the coaxial pulse autotransformer was developed in accordance with the technical task. Oscillograms of the system operation are presented. Experiments on visualization of test objects were done, the results were described.

Degree of implementation: laboratory layout.

Application areas: an improvement in the pumping scheme of metal vapor lasers in order to improve the efficiency and the output characteristics of the radiation.

Обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Определения

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

- Лазер – это оптический квантовый генератор, преобразующий энергию накачки в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.
- Газоразрядная трубка – керамическая герметизированная трубка, заполненная парами металлов при относительно низком парциальном давлении и включающая в конструкцию два электрода, при повелении разности потенциалов определенного уровня между которыми происходит электрический пробой.
- Активная оптическая система – это система, которая содержит усилитель яркости на переходах самоограниченных лазеров.
- Кабельный импульсный трансформатор – Импульсный трансформатор обмотки которого выполнены коаксиальным кабелем, сердечник состоит из набора ферритовых колец.

Обозначения и сокращения

В данной работе применены сокращения:

- ЛПМ – лазеры на парах металлов;
- АОС – активная оптическая система;
- ГРТ – газоразрядная трубка;
- ЧСИ – частота следования импульсов;
- СУ – система управления;
- НИР – научно-исследовательская работа;
- ИКТ – импульсный кабельный трансформатор.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты и нормативно-правовые документы:

1. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация
2. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях
3. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)
4. ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) Оборудование производственное. Общие требования безопасности
5. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
6. ГОСТ 721-77 Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В
7. ГОСТ 12.1.030-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление (с Изменением N 1)
8. РД 34.03.603 Правила применения и испытания средств защиты, используемых в электроустановках, технические требования к ним;
9. Согласно ГОСТ 124.003-74 – техника безопасности при работе с лазерами
10. СанПиН 5804-91 Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров

11. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение
12. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
13. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) Средства и методы защиты от шума. Классификация
14. ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ) Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности
15. ГОСТ 12.1.005-88. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны
16. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
17. ГОСТ 17.2.1.01-76 Охрана природы. Атмосфера. Классификация выбросов по составу
18. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования
19. Трудовой кодекс РФ
20. Конституция РФ
21. НПБ 166-97 Пожарная техника. Огнетушители. Требования к эксплуатации

Оглавление

РЕФЕРАТ	6
ВВЕДЕНИЕ	13
ГЛАВА 1. ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ	15
1.1 Общие сведения о лазерах на самоограниченных переходах	15
1.2 Основные этапы развития лазеров на самоограниченных переходах	18
1.3 Основные этапы развития лазеров на парах меди	21
1.4 Традиционная схема накачки лазеров на парах металлов	23
ГЛАВА 2. КАБЕЛЬНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР	26
2.1 Импульсный трансформатор с обмоткой из коаксиального кабеля	26
2.2 Расчет элементов схемы замещения трансформатора	27
2.3 Определение числа витков, выбор материала и параметров магнитопровода	32
2.4 Влияние скорости нарастания индукции на работу сердечника	35
2.5 Конструкция «кабельного» импульсного трансформатора	38
2.6 Цели использования кабельного импульсного трансформатора	39
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КАБЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА.	43
3.1 Общий вид автотрансформатора	43
3.2 Техническое задание для расчета	44
3.3 Выбор кабеля для обмотки	44
3.4 Выбор сердечника для автотрансформатора	45
3.5 Потери в сердечнике автотрансформатора	48
3.6 Моделирование схемы накачки лазера с автотрансформатором	49
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	53
4.1 Объекты и методы исследования	53
4.2 Экспериментальная часть без генерации излучения	57
4.3 Эксперименты с введением в трубку паров CuBr	68
4.4 Влияние давления в ГРТ на мощность генерации	75
ГЛАВА 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	81
Введение	81
5.1 Предпроектный анализ	81
5.2 Инициация проекта	86
5.3 Планирование управления научно-техническим проектом	88
5.4 Оценка сравнительной эффективности исследования	96

ГЛАВА 6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	101
Введение	101
6.1. Производственная безопасность	101
6.1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования	101
6.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований	106
6.2 Экологическая безопасность	115
6.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.	116
6.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	122
ПРИЛОЖЕНИЕ А The cable pulse transformer as an element of the laser's power supply	127

Введение

На сегодняшний день лазеры на самоограниченных переходах атомов меди являются одним из эффективнейших источников излучения среди лазеров, излучающих в видимом спектре [1-3]. Отличительной особенностью таких лазеров является работа в импульсно-периодическом режиме с достаточно высокой частотой следования импульсов (ЧСИ) и высокой импульсной мощностью генерации [1-5]. Благодаря своим уникальным характеристикам такие лазеры применяются в различных областях: микрообработка материалов, зондирование атмосферы, демонстрационные системы, визуализация быстропротекающих процессов и т.д. [5-10].

КПД таких лазеров варьируется от 1 до 4 %. Для того чтобы увеличить этот показатель и улучшить условия эксплуатации в схеме накачки лазера используют кабельный импульсный трансформатор.

На параметры импульса значительное влияние оказывает собственная емкость и индуктивность разрядного контура генератора. Величина этих паразитных параметров определяется размерами установки и увеличивается с увеличением габаритов этой установки. В связи с этим, требования уменьшения длительности фронта и длительности импульса в целом и увеличения амплитуды импульса накачки являются противоречивыми, так как при росте тока и напряжения увеличиваются габариты импульсной установки, а вместе с ней растут и значения паразитных параметров. Для устранения этих противоречий могут быть использованы коаксиальные конструкции с распределенными параметрами. К одной из таких конструкций относится импульсный трансформатор с обмоткой из коаксиального кабеля [1].

Использование этого устройства в разы снижает паразитные емкости и индуктивности. Плюс габариты такой системы гораздо меньше по сравнению с обычными импульсными трансформаторами за счет того, что в качестве вторичной обмотки используется сплошная внутренняя жила кабеля, а в качестве первичной обмотки оплетка этого же кабеля. Обычные импульсные

трансформаторы, которые применяются в микросекундном диапазоне не подходят для использования в лазерной технике, так как с увеличением амплитуды импульса увеличивается толщина изоляции, что оказывает влияние на габариты трансформатора, искажающие импульс, в сторону увеличения. А для того, чтобы трансформатор установить в корпус лазера необходимо минимизировать его габариты. Но у трансформатора на отрезках длинной линии есть недостатки в виде необходимости применения большого числа развязывающих импедансов. Это устраняется, выполнением обмотки коаксиальным кабелем на обычном импульсном трансформаторе с ферромагнитным сердечником.

Целью научно-исследовательской работы является улучшение характеристик лазера на парах бромида меди, используя кабельный автотрансформатор в разрядном контуре, что обеспечит изменение параметров импульса накачки на ГРТ.

Актуальность работы достаточно сложно переоценить, поскольку в современном мире насчитывается множество различных сфер деятельности, где используются лазеры, следовательно, улучшение характеристик лазеров является достаточно актуальной задачей.

Глава 1. Лазеры на парах металлов

1.1 Общие сведения о лазерах на самоограниченных переходах

В лазерах на парах металлов активными частицами являются атомы или ионы металлов. Другими словами, лазерная генерация достигается на переходах ионов и атомов металла, используемого в качестве активного вещества. Возбуждение газовых лазеров подразумевает, прежде всего, переход активного вещества из исходного состояния в газовое. Данный переход осуществляется за счет нагрева металлических элементов, вследствие чего происходит их постепенное испарение [1].

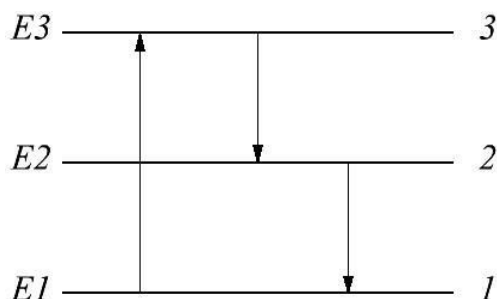
Существует несколько методов обеспечения температуры плавления активного вещества. Одним из них является использование внешней нагревательной печи, размещенной в районе активных зон газоразрядной трубки. Использование этого метода позволяет увеличить эффективность лазера за счет дополнительного энергопотребления от печи.

Модификацией этого метода является расположение лазерного вещества в специальных отсеках газоразрядной трубки, которые сопряжены с внешними нагревательными элементами. Вследствие нагрева образуются пары лазерного вещества, которые заполняют газоразрядную трубку, после чего запускается возбуждение лазерной среды. Такой метод удобен и конструктивно прост.

Также он может быть использован для режима саморазогрева газоразрядной трубки.

После образования паров активного вещества происходит его возбуждение за счет преобразования внешней энергии в энергию газового разряда. Данный процесс может носить как импульсный, так и непрерывный характер в зависимости от типа лазера. Возбуждение активных частиц приводит к нарушению равновесного распределения атомов по энергетическим уровням и созданию инверсной населенности, что является необходимым условием возникновения лазерной генерации. Механизм возбуждения активного вещества называется накачкой [1-4].

Среди всех видов лазеров выделяют отдельную группу лазеров, генерирующих на самоограниченных переходах. Отличительным признаком таких лазеров является самоограниченность генерации, обусловленная соотношением времен жизни атомов на их рабочих уровнях [1].



1 – основной квазистатический уровень, 2 – нижний метастабильный уровень, 3 – верхний резонансный уровень

Рисунок 1.1 – Схема энергетических уровней с самоограниченными переходами между ними

Рисунок 1.1 схематично иллюстрирует изображение самоограниченной генерации. В результате процесса накачки происходит активное заселение верхнего резонансного уровня (3). Нижний метастабильный уровень (2) заселяется в свою очередь в результате вынужденного перехода возбужденных атомов с резонансного уровня по истечению время их жизни. Данный переход сопровождается испусканием кванта света. Сгенерированный фотон принято называть «затравочным». Излученный фотон, взаимодействуя с возбужденными атомами, вызывает рождение еще одного такого же фотона. Поскольку спектр энергетических значений у атомов одного и того же металла идентичен, то вынужденное излучение, порожденное «затравочным» фотоном, создает лавину идентичных фотонов – именно этим обусловлена когерентность, монохроматичность и направленность вынужденного излучения [1-4, 13].

Сам процесс возбуждения газовых лазеров, как правило, представляет собой электрический разряд в герметичном сосуде, являющемся активным элементом. Конструкция такого активного элемента, как правило, представляет

собой два электрода, разделенных керамической герметизированной трубкой, заполненной парами металлов при относительно низком парциальном давлении (10^{-3} – 10^{-1}) торр. При отсутствии напряжения на электродах или же при их низком абсолютном значении трубка представляет собой практически идеальный изолятор. При появлении между электродами определенного уровня разности потенциалов газоразрядная трубка начинает проводить ток. Далее возбужденный электрон сообщает энергию активным частицам, запуская тем самым механизм генерации вынужденного индуцированного излучения. Генерация лазеров на самоограниченных переходах достигается за счет импульсного возбуждения [1-4].

Также в газоразрядной трубке обеспечивается наличие буферного газа, давление которого может достигать весьма высоких значений порядка 300 торр. В качестве буферного газа чаще всего используется гелий, неон и водород. Концентрация буферного газа определяет напряжение пробоя газовой среды и способствует созданию инверсной населенности [1-4, 13].

Поскольку температурный диапазон для лазеров на парах галогенидов металлов относительно узок, газоразрядные трубки в этом случае являются универсальными лазерными излучателями. Также допускается использование различных лазерных веществ в одной газоразрядной трубке, что обеспечивает лазерную генерацию на нескольких линиях одновременно.

Наиболее привлекательными характеристиками резонансно-метастабильных генерирующих на самоограниченных переходах лазеров являются высокий КПД, высокое качество пучка, а также высокая средняя и пиковая мощности в ультрафиолетовой, видимой и близкой инфракрасной спектральных областях [10-13].

1.2 Основные этапы развития лазеров на самоограниченных переходах

Генерация на самоограниченных переходах атомов металла впервые была получена на парах свинца американскими учеными в 1965 году. Длина линии генерации при этом составила 722 нм [1]. Также есть свидетельства о том, что в этом же году на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва) [5] были совершены первые успешные эксперименты по получению генерации на самоограниченных переходах атомов марганца и свинца, что соответствовало зеленой и красной области спектра соответственно. Чуть позже американскими учеными была получена генерация и на парах меди [6].

Среди наиболее важных результатов независимых исследований российских и американских ученых можно отметить, прежде всего, исключительно импульсный характер полученной генерации. Это явление обусловлено связью с метастабильностью нижнего уровня лазерного перехода. Длительность полученных импульсов при этом варьировалась в диапазоне от 10 нс до 30 нс.

С тех пор было опубликовано большое число работ, посвященных исследованиям физических процессов, которые протекают в активной среде лазеров на самоограниченных переходах, а также определяющих параметры их генерации. На протяжении нескольких десятилетий интерес к разработке, исследованию и применению таких лазеров подпитывался за счет их широких возможностей и многоплановости. Активный интерес к развитию лазеров на самоограниченных переходах атомов металла обуславливался их уникальными характеристиками, не присущими лазерам других видов. Среди таких характеристик можно выделить высокую среднюю и пиковую выходную мощности, высокое качества пучка, его низкая расходимость, высокий уровень монохроматичности излучения, возможность одновременной работы в широком спектральном диапазоне и т.д. [1-4, 13].

Конструкция первых лазеров на парах металлов была громоздкой и непрактичной. Такие лазеры представляли собой высокотемпературную электропечь и керамическую газоразрядную трубку. Экспериментальным путем было установлено, что для получения паров чистых металлов, как например меди и золота, температура стенок лазерного излучателя должна быть порядка (1500–1600) °C. Обеспечение такой температуры и поддержание ее на заданном уровне было и остается связанным с определенными технологическими трудностями, к тому же кварцевые газоразрядные трубки не способны выдерживать столь высокую температуру, поэтому для газоразрядной трубки использовалась высокотемпературная керамика. Время разогрева такой газоразрядной трубки до рабочей температуры, и время достижения ей комнатной температуры, составляло около 8 часов, что также представляло собой весомый недостаток работы с такими лазерами [1, 2].

На протяжении 60-70-ых годов исследования в области генерации на самоограниченных переходах атомов металлов интенсивно развивались. До 1978 года было установлено, что атомные и ионные переходы 27-и металлических элементов сопровождаются генерацией вынужденного излучения. Вплоть до 1990 года эта цифра постепенно увеличивалась до 42 элементов, включая металлоиды. К 1990 году количество изученных лазерных самоограниченных переходов с резонансного на метастабильный уровень достигло 700. Среди них как наиболее значимые выделяют лазерные переходы на парах атомов меди, магния, серебра, бария, бериллия, кальция, стронция, иттербия и т.д. [1, 2].

За время исследований лазеров на самоограниченных переходах генерация была получена как на нейтральных атомах, так и на ионах в диапазоне длин волн от 312,2 нм (пары золота) до 645,6 нм (пары стронция).

В 1973-ем году была впервые получена генерация лазеров на парах химического соединения хлора и меди. В этом случае после испарения донорских молекул газовый разряд вызывал диссоциацию молекулы CuCl и

последующее возбуждение свободных активных частиц. Данная работа считается родоначальницей лазеров на парах галогенидов металлов. Наиболее важным достоинством использования галогенидов металлов в качестве лазерного вещества стало их сравнительно невысокая рабочая температура, которая, как правило, варьируется в диапазоне от 250 °С до 600 °С. Следствием этого фактора стала существенное упрощение разработки и эксплуатации лазерного излучателя, а также снижение его стоимости. Также сравнительно низкая теплоемкость трубки для паров галогенидов металлов обеспечило сокращение времени выход на режим, что, безусловно, стало очередным достоинством для практических применений [1, 2, 5].

По мере развития лазеров на парах металлов формировалась такая перспективная задача, как разработка эффективных импульсно- периодических лазеров. Данному вопросу было посвящено множество теоретических и экспериментальных работ, которые базируются на исследованиях физики газового разряда, физических и химических процессах низкотемпературной плазмы и атомной физики. Наиболее мощными и эффективными признаны лазеры на парах меди, генерирующих две спектральные линии: зеленую с длиной волны 510,6 нм и желтую с длиной волны 578,2 нм. Излучение испускается возбужденными атомами меди, при их переходе из резонансного состояния (энергия возбуждения около 3,8 эВ) в нижнее метастабильное состояние (энергия возбуждения соответственно 1,39 эВ и 1,64 эВ) [1, 2].

Благодаря своим уникальным характеристикам лазеры на парах меди на сегодняшний день являются наиболее изученными и представляющими интерес в практическом применении. Именно на атомах меди был впервые реализован саморазогревной режим работы лазеров на самоограниченных переходах [1, 2, 14]. Таким образом, в настоящее время лазеры на парах меди активно используют в промышленности для решения целого ряда задач.

1.3 Основные этапы развития лазеров на парах меди

Лазерная установка на парах меди был разработан в 1965 году американским ученым Уильямом Уолтером. Данный лазер считается наиболее мощным источником когерентного монохроматического излучения в оптическом диапазоне. Основной проблемой, связанной с разработкой и эксплуатацией такого лазера, является высокая рабочая температура порядка 1500 °С [7].

В 1960-х годах на базе Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва) был проведен ряд успешных экспериментов по получению генерации на переходах атома меди. Полученная генерация была охарактеризована как рекордное усиление света активными средами лазеров на парах металлов. Полученный коэффициент усиления был настолько велик, что для формирования мощного вынужденного излучения использовалось либо одно зеркало резонатора, либо же зеркала не использовались вообще [8].

В начале 1970-х годов многие исследовательские лаборатории, работающие над медными лазерами, поставили приоритетным направлением создание низкотемпературного варианта исполнения лазера на парах меди. Идея создания такого лазера базировалась на использовании в качестве активного вещества химических соединений, температура парения которых была бы существенно ниже температуры парения чистой меди. Данная идея также впервые была сформулирована в научной работе Уильяма Уолтера, однако на ее реализацию потребовалось более 10 лет. Первые успешные экспериментальные результаты были получены в 1973 году двумя независимыми научными лабораториями. Американские ученые в лаборатории Вестингхауса сообщили о том, что им удалось получить генерацию на парах иодида меди. Другая американская группа ученых, работающая в ракетной лаборатории Пасадена, добилась генерации лазера на парах хлорида меди [7, 8].

В 1974 году Болгарская исследовательская команда под руководством Н. Саботинова в Институте твердотельной физике Болгарской Академии наук получила лазерную генерацию на парах бромида меди. Полученный результат

был запатентован [9].

Первые научные исследования показали, что лазеры на парах бромида меди существенно превосходят лазеры на парах меди. Рабочая температура таких лазеров снизилась до (500–600) °С. В качестве конструкции лазерного активного элемента использовались газоразрядные трубки, изготовленные из кварцевого стекла без использования высокотемпературной керамики. Данное конструктивное решение существенно упростило процесс производства активного элемента и снизило его стоимость. Разработанные лазеры на парах бромида меди выходили на режим в течение (5–10) минут, в то время как наиболее удачные варианты исполнения лазеров на парах чистой меди начинали генерировать по прошествии не менее (30–40) минут после включения.

Далее болгарская исследовательская лаборатория, возглавляемая профессором Н. Саботиновым, принялась за работу по устранению проблем, связанных с разработкой лазеров на парах бромида меди. Среди этих проблем было выделено получение стабильной лазерной генерации, увеличение времени жизни лазерного активного элемента и обеспечение высокой выходной мощности. Дальнейшие научные достижения в перечисленных направлениях были запатентованы.

Помимо этого, была предложена и запатентована идея использования полых катодов с резервуарами бромида меди. Характерной особенностью таких электродов является то, что они остаются чистыми в течение времени эксплуатации лазера, что способствует поддержанию стабильного режима разряда.

Также в данной лаборатории были разработаны активные элементы, предусматривающие холодные зоны с температурой -5/-8 °С. Введение таких холодных зон обеспечивало контроль оптимальной концентрации брома в лазерном активном веществе. Была получена выходная мощность порядка

100 Вт. Данные результаты были представлены в рамках проекта NATO SfP-972685 “NATO SfP-Copper Bromide Laser” [10].

Затем в рамках проекта CIPA-CT94-0214 Европейского Союза выходную мощность излучения CuBr-лазера удалось увеличить до 125 Вт, КПД при этом составил порядка 3,8 %. Время жизни лазерного элемента составило при этом не менее 1000 часов.

Следует отметить, что наряду со всем вышеперечисленным развитие самоограниченных лазеров на парах атомов меди еще не закончено и имеет как ближнюю, так и дальнюю перспективу. К ближней перспективе относится создание, во-первых, эффективных импульсно-периодических лазеров на парах галогенидов меди, использующихся в качестве генераторов, со средней мощностью генерации на уровне нескольких сотен ватт и при практическом КПД в несколько процентов. Во-вторых, создание высокоэффективных лазеров на парах меди и галогенидов меди с практическим КПД на уровне (5–8) % и со средними мощностями генерации в диапазоне от нескольких ватт до нескольких десятков ватт. Также как ближнюю перспективу можно выделить оптимизацию уже изученных режимов работы лазеров на парах меди [1].

Кроме того, ближняя перспектива включает в себя разработку новых технологий на базе лазеров на парах меди для визуализации быстротекущих процессов, защищенных от наблюдателя мощной фоновой засветкой, например, современные технологии нанесения и обработки покрытий [11, 12].

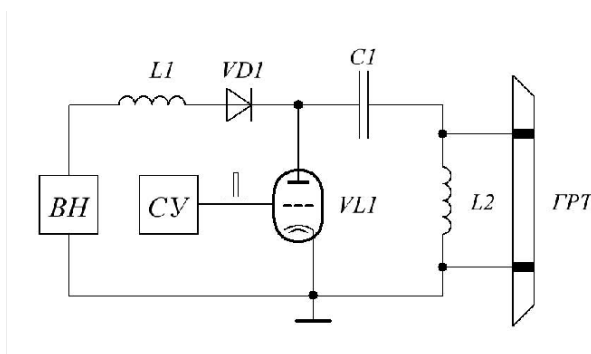
К отдаленной перспективе следует отнести создание мощных и эффективных лазеров с большой апертурой луча, возбуждаемых пучками электронов с энергиями (1–10) кэВ.

1.4 Традиционная схема накачки лазеров на парах металлов

Неотъемлемой частью работы любого лазера является его накачка – то есть процесс преобразования внешней энергии, например, электрической, в

энергию лазерного излучения. На рисунке 1.2 представлена традиционная схема накачки газовых лазеров. Высоковольтный источник постоянного напряжения (ВН) заряжает емкостной накопитель энергии С1 через зарядный дроссель L1 и защитный диод VD1. Система управления формирует импульс запуска, который поступает на сетку тиратрона VL1, в результате чего он коммутирует.

Следовательно, конденсатор С1 подключается параллельно нагрузке, в качестве которой используется газоразрядная трубка (ГРТ). Конденсатор С1 с высокой скоростью разряжается на ГРТ, внутри которой формируется импульс напряжения отрицательной полярности. Затем следует пауза, во время которой накопительная емкость С1 вновь заряжается от источника питания, и все процессы повторяются [13].



ВН – источник высокого напряжения, L1 – зарядный дроссель, VD1 – защитный диод, С1 – накопительная емкость, L2 – шунтирующий дроссель, ГРТ – газоразрядная трубку, VL1 – тиратрон, СУ – система управления

Рисунок 1.2 – Традиционная схема источника накачки

В таких схемах в качестве коммутатора активно используют тиратроны, поскольку они в отличие от полупроводниковой техники позволяют коммутировать высоковольтное напряжение с высокой скоростью нарастания тока. Когда тиратрон открывается, на нем происходит уменьшение напряжения до величины напряжения горения разряда, которое составляет порядка 50 В. Эта величина напряжения практически всегда существенно меньше напряжения используемого источника питания. По мере разряда конденсатора через

тиратрон напряжение в промежутке анод-катод уменьшается. Когда напряжение станет ниже требуемой для поддержания разряда величины, происходит диффузия ионов и электронов к электродам и стенкам вакуумной оболочки, оседание на их поверхностях и комбинирование между собой, вследствие чего плазма «распадается». Соответственно протекание тока через тиратрон прекращается, промежуток анод-катод восстанавливает свои изоляционные свойства, то есть это эквивалентно тому, что прибор перешел в закрытое состояние.

Таким образом, тиратрон позволяет сформировать высоковольтный импульс за счет быстрого подключения емкостного накопителя энергии к нагрузке [14]. СУ при этом должна обеспечивать формирования импульсов запуска со следующими параметрами:

- время длительности порядка 1 мкс;
- амплитуда напряжения от 300 В до 1500 В;
- частота следования импульсов от 7 кГц до 50 кГц.

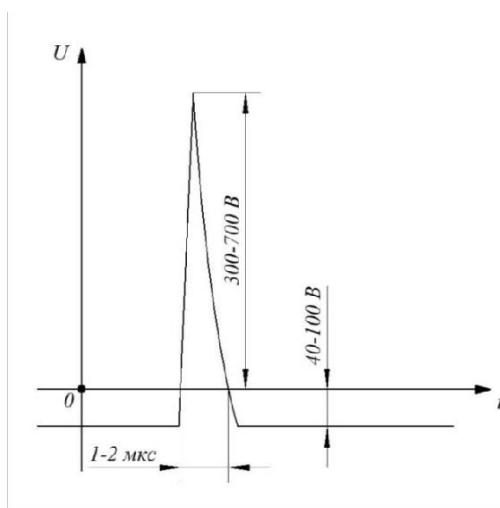


Рисунок 1.3 – Импульс запуска тиратрона и его параметры

На рисунке 1.3 изображен импульс напряжения, который поступает на сетку тиратрона. При этом во время паузы между управляющими импульсами на катод тиратрона подается отрицательное напряжение порядка (40–100) В. Это напряжение называют напряжением смещения, оно используется для

ликвидации возможных ложных коммутаций прибора.

Глава 2. Кабельный импульсный трансформатор

2.1 Импульсный трансформатор с обмоткой из коаксиального кабеля

Схема соединения обмоток импульсного трансформатора на ферромагнитном сердечнике с обмоткой из коаксиального кабеля с коэффициентом трансформации $n=3$, приведена на рисунке 2.1.

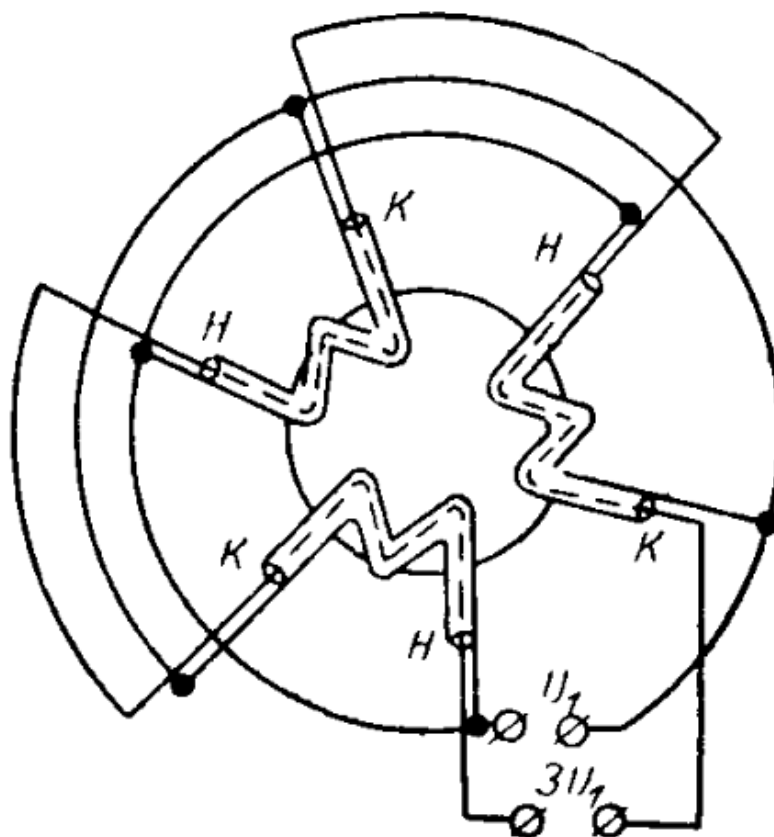


Рисунок 2.1 – Схема соединения обмоток «кабельного» импульсного трансформатора: коэффициентом трансформации $n=3$.

Обмотки собираются из нескольких отрезков коаксиального кабеля. В данном случае количество отрезков 3. Начала и концы оплетки кабельных отрезков соединяются параллельно и таким образом образуют первичную обмотку трансформатора. Жилы кабельных отрезков соединяются последовательно и образуют вторичную обмотку. Число отрезков кабеля соответствует коэффициенту трансформации n .

Для того, чтобы увеличить индуктивность обмотки, кабеля необходимо намотать на сердечник, выполненный из ферромагнита. В случае получения непродолжительных по времени импульсов, для сердечника лучшим материалом можно считать феррит.

Определение паразитных параметров трансформатора производится с точностью, достаточной для эксперимента, используя погонные параметры кабеля. У коаксиальных кабелей достаточно большой запас импульсной электрической прочности, это позволяет получить на выходе автотрансформатора импульсы с наносекундной длительностью и высокой амплитудой, порядка десятков киловольт. Одним из главных достоинств кабельного трансформатора является то, что они устойчивы к сильным динамическим воздействиям, которые возникают, когда через обмотки протекают токи больших, что объясняется тем, что обмотки коаксиальны. Исходя из этого свойства можно использовать такой трансформатор для формирования, существенных по значению, импульсных токов.

Максимальная амплитуда импульса на выходе «кабельного» импульсного трансформатора зависит от импульсной электрической прочности коаксиальных кабелей.

Далее приведены основные соображения для расчета параметров «кабельного» импульсного автотрансформатора и показано как происходит формирование высоковольтных наносекундных импульсов с помощью этого устройства [15].

2.2 Расчет элементов схемы замещения трансформатора

За счет погонной емкости кабеля C_0 определяется емкость «кабельного» импульсного трансформатора. Для удобства при анализе процессов в цепи трансформатора, распределенная емкость обмоток заменяется эквивалентной (динамической) емкостью, которую приводят к виткам первичной обмотки (к напряжению первичной обмотки U_1).

Динамическая емкость отличается от статической и ее величину можно определить, используя энергию, запасаемую в обмотках. Из соображений о том, как рассчитать динамическую емкость можно увидеть [16, 17], что для «кабельного» импульсного трансформатора динамическая емкость рассчитывается по формуле (1)

$$C = \frac{n \cdot (n \pm 1) \cdot (2 \cdot n \pm 1)}{6} \cdot C_0 \cdot l_k, \quad (1)$$

где n - коэффициент трансформации;

l_k - длина отрезка кабеля.

Знак минус в формуле (1) показывает случай трансформации, при котором не изменялась полярности импульса. При трансформации импульса без изменения полярности и $n = 1$, исходя из формулы (1), величина динамической емкости при этом, равняется нулю. Физический смысл заключается в том, что потенциалы вдоль оплетки (первичной обмотки) и жилы (вторичной обмотки) в этом случае равны по знаку и величине. Это говорит о том, что не происходит заряда емкости кабеля.

Определение индуктивности рассеяния «кабельного» импульсного трансформатора вытекает из того как распределены поля между первичной и вторичной обмотками, т. е. между оплеткой и жилой кабеля. Так как распределение поля между обмотками определяет погонную индуктивность кабеля L_0 , легко увидеть, что если «кабельный» трансформатор содержит n отрезков кабеля (секций), то индуктивность, рассеиваемая вторичной обмоткой, приведенная к виткам первичной обмотки трансформатора L , можно определить по формуле

$$L = \frac{L_0 \cdot l_k}{n}, \quad (2)$$

где L_0 - индуктивность кабеля на 1 м кабеля;

l_k - длина отрезка кабеля.

Отличием «кабельного» трансформатора от импульсных трансформаторов с обычным исполнением обмоток является то, что у его первичной обмотки (оплетка) нет магнитного потока, не связанного со вторичной обмоткой (жилой), то есть первичная обмотка не имеет потока рассеяния.

Из формулы (2) видно, что погонная индуктивность определяет индуктивность рассеяния «кабельного» импульсного трансформатора и при заданной длине кабеля не зависит от наличия сердечника и формы катушек.

Нужно знать волновое сопротивление кабельного импульсного трансформатора для того, чтобы рассчитать степень искажения фронта импульса

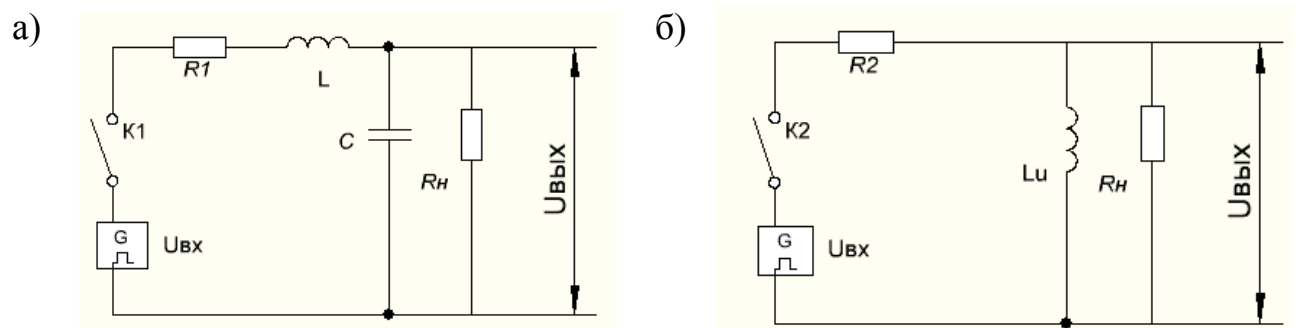
$$\rho = \sqrt{L/C} \quad (3)$$

Из формул (1) и (2) имеем:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\frac{6}{(n \pm 1) \cdot (2 \cdot n \pm 1)}}, \quad (4)$$

где $\rho_0 = \sqrt{L_0/C_0}$ - волновое сопротивление кабеля.

Знак минус показывает случай трансформации без изменения полярности импульса. Знак плюс соответствует случаю трансформации с изменением полярности импульса.



а) — при высоких частотах; б) — при низких частотах

Рисунок 2.2 – Схема замещения импульсного трансформатора

Длительность фронта импульса кабельного импульсного трансформатора находят исходя из изучения и рассмотрения переходных процессов в схеме импульсного трансформатора (рисунок 2.2 а) с приведением параметров к виткам первичной обмотки: R_1 - внутреннее сопротивление источника; $R'_H = R_H/n^2$ - приведенное сопротивление нагрузки.

Анализируя переходной процесс, в схеме (рисунок 2.2 б) видно, что при действии на входе схемы скачка напряжения, погонная длительность фронта $\tau_{\phi 0}$ в расчете на 1 м обмотки (длительность фронта импульса на выходе) с, достаточной для инженерного расчета точностью, определяется формулой (5), в котором L , C и ρ рассчитываются по (1-4):

$$\tau_{\phi 0} = \theta \cdot (1,2 + 2 \cdot \xi^2), \quad (5)$$

где

$$\begin{cases} \xi = \frac{\sqrt{k}}{2} \cdot \left(\frac{\rho}{R'_H} + \frac{R_1}{\rho} \right); \\ \theta = \sqrt{k \cdot L \cdot C}; \\ k = \frac{R'_H}{R_1 + R'_H}. \end{cases} \quad (6)$$

Исходя из (6) находим

$$R'_H = \frac{\rho \cdot \sqrt{k}}{\xi \mp \sqrt{\xi^2 - \xi_{\min}^2}}, \quad (7)$$

где $\xi_{\min} = \frac{R_1}{R_1 + R'_H}$ - минимальное значение, которое определяется при

исследовании формулы для нахождения ξ , на минимум.

Из формул (6,7) можно рассчитать зависимость $\tau_{\phi 0} = f(R'_H)$ при известных значениях ρ_0 , C , n , k .

На рисунке 3 показан график зависимости $\tau_{\phi 0} = f(R'_H)$ для импульсного трансформатора, в качестве обмотки которого использован коаксиальный кабель с $\rho_0 = 50 \text{ Ом}$ и $C_0 = 100 \text{ пФ/м}$. Эти значения ρ_0 и C_0 примерно соответствуют волновому сопротивлению и погонной емкости для большинства коаксиальных кабелей, которые могут использоваться в как обмотки «кабельных» импульсных трансформаторов. Из графиков, на рисунке 2.3, при известной длине кабеля и значения приведенного сопротивления, можно с достаточной точностью рассчитать длительность фронта импульса используя формулу

$$\tau_{\phi} = \tau_{\phi 0} \cdot l_k \quad (8)$$

Рассматривая графики, на рисунке 2.3, можно сделать такие выводы.

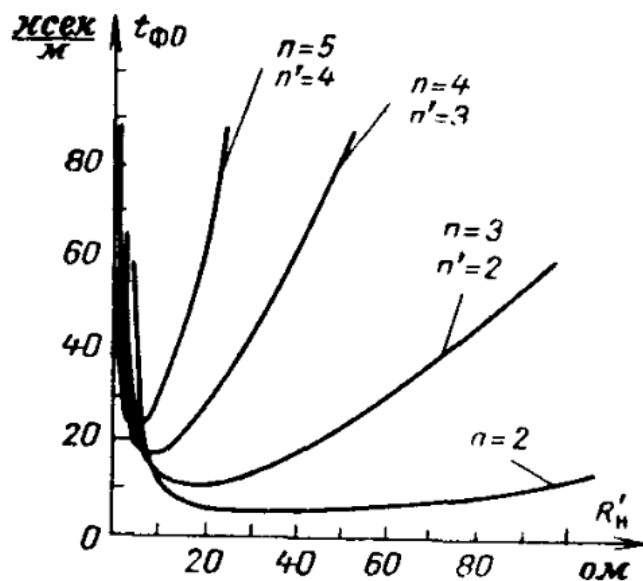
1 Для кабеля с $\rho_0 = 50 \text{ Ом}$ и $C_0 = 100 \text{ пФ/м}$, при условии что коэффициент трансформации от 2 до 4, минимальное значение длительности импульса наблюдается при достижении R_H нескольких сотен Ом, это соответствует мощности в несколько десятков мегаватт если полностью задействовать коаксиальный кабеля по импульсной электрической прочности.

2 Если длина кабеля первичной обмотки составляет порядка нескольких десятков сантиметров, при коэффициенте трансформации два или три и нагрузке, которая соответствует оптимальному режиму работы, то длительность фронта может быть не выше единиц наносекунд.

Нужно заметить, что при данной длительности импульса и известной амплитуде, длина кабеля обмотки зависит от параметров материала, из которого сделан сердечник. Таких как: магнитная проницаемость μ и индукция насыщения B_m , а именно: при увеличении μ и B_m длина кабеля укорачивается. Отношение $t\tau_{\phi}/\tau_{и}$ для выбранной модели сердечника и материала при заданной

амплитуде, должно сохраняться. Например, при использовании никель-цинкового феррита типа Ф1-1000 при заданной амплитуде $U_m = 50$ кВ, минимальное отношение $\frac{\tau_\phi}{\tau_{и}} \approx 0,05$.

В общем говоря, начиная с некоторых значений длительности импульса (для ферритов Ф1-1000 с $\tau_{и} \approx 100$ нс), величина магнитной проницаемости μ , зависит от длительности импульса и имеет падающую характеристику. Соответственно отношение $t\tau_\phi/\tau_{и}$ изменяется в сторону увеличения.



n — коэффициент трансформации без изменения полярности импульса;
 n' — коэффициент трансформации при изменении полярности импульса.

Рисунок 2.3 — Зависимость погонной длительности фронта импульса от пересчитанного сопротивления нагрузки при заданных значениях $\rho_0 = 50$ Ом,

$$C_0 = 100 \text{ пФ/м}, k = 0,5$$

2.3 Определение числа витков, выбор материала и параметров магнитопровода

Рассматривая как действует прямоугольный импульс на первичную обмотку трансформатора и анализируя эквивалентную схему рисунка 2,б были получены формулы для расчета таких параметров импульсного автотрансформатора как: Число витков первичной обмотки, Индуктивность

намагничивания, спад вершины импульса [18].

Число витков первичной обмотки

$$\omega_1 = \frac{U_{\text{вх}} \cdot \tau_{\text{и}}}{\Delta B \cdot S} \cdot 10^4. \quad (9)$$

Индуктивность намагничивания

$$L_{\mu} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot \omega_1^2 \cdot S}{l_0} \cdot \mu, \text{ Гн.} \quad (10)$$

Спад вершины импульса

$$\lambda = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{\tau_{\text{и}} \cdot R_1 \cdot R'_H}{L_{\mu} \cdot (R_1 + R'_H)}. \quad (11)$$

Здесь $U_{\text{вых}}$ - напряжение на первичной обмотке, В;

$U_{\text{вых}}$ - напряжение на нагрузке, В;

$\tau_{\text{и}}$ - длительность импульса, с;

R_1 –эквивалентное внутреннее сопротивление генератора, Ом;

R'_H -приведенное сопротивление нагрузки, Ом;

S – Площадь сечения сердечника, см²;

l_0 - длина средней силовой линии магнитопровода, см;

μ -магнитная проницаемость;

ΔB - величина магнитной индукции на частном цикле петли гистерезиса,

Тл.

Пользуясь формулами (9-11), можно рассчитать параметры обмотки и сердечника. Исходя из приведенных формул, можно сказать, что максимальная индуктивность намагничивания и минимальное число витков (а, следовательно, минимальный фронт при минимальном спаде плоской части) можно получить при максимальном отношении S/l_0 сердечника. Очевидно то, что сердечник в форме кольца является более выгодным со всех точек зрения (полного задействования магнитопровода, понижения величин паразитных параметров и т. д.). Но есть ограничение, которое не позволяет получить большое

соотношение S/l_0 используя одно кольцо из-за увеличения отношения диаметров (наружного и внутреннего). При одной и той же намагничивающей силе напряженность магнитного поля будет зависеть от длины магнитного пути:

$$H = \frac{I_\mu \cdot \omega_1}{l}, \frac{A}{\text{см}}. \quad (12)$$

Но из-за существенной разницы в диаметрах будут отличаться $l_{\text{внеш}}$ и $l_{\text{внутр}}$ кольца и следовательно $H_{\text{внеш}} \ll H_{\text{внутр}}$, что в большинстве случаев приводит к насыщению внутренней части кольца и соответственно к снижению физического сечения сердечника. Лучшим вариантом для получения больших отношений S/l_0 ($S/l_0 \approx 1 \div 1,5$) является конструирование сердечника состоящего из нескольких колец.

При проектировании импульсного трансформатора необходимо чтобы магнитный материал обладал такими свойствами как:

- 1) большая величина магнитной индукции B_m ;
- 2) большое значение магнитной проницаемости μ ;
- 3) большая величина удельного сопротивления $\rho_{\text{ж}}$;
- 4) малые потери на вихревые токи;
- 5) зависимость μ от частоты должна быть минимальна.

Практически не существует магнитного материала, обладающего всеми указанными качествами одновременно. Из доступных на сегодняшний день материалов можно использовать сплавы из пермаллоя. Достоинством таких сплавов можно считать большую величину индукции насыщения и магнитную проницаемость ($B_m = 0,7-1,5$ Тл, $\mu \approx 150\ 000$). Основным недостатком сплавов из пермаллоя - малое удельное сопротивление. При коротких длительностях импульса порядка $10^{-8} \div 10^{-7}$ секунд, величину μ резко снижают, возникающие вихревые токи. Для того, чтобы уменьшить вихревые токи сердечники изготавливают из листов материала, с микронной толщиной ленты.

Минусом использования сердечников из пермаллоя является необходимость изолирования обмотки и сердечника, друг от друга.

Ферритовые материалы обладают значительным удельным сопротивлением, это дает возможность использования их без дополнительной высоковольтной изоляции. Это одно из главных отличий феррита от пермалловых сплавов

Зависимость $\mu = f(\tau_{\text{и}})$ и вихревые токи у феррита не так резко выражены, как у пермалловых сплавов. Минусами ферритовых материалов можно назвать относительно низкое значение B_m и μ .

2.4 Влияние скорости нарастания индукции на работу сердечника

Во время формирования высоковольтных наносекундных импульсов скорость нарастания магнитной индукции, может достигать значений порядка $10^{-8} \div 10^{-7}$ Тл/с. Результатом этого становится возбуждение мощных вихревых токов в магнитопроводе, которые являются создателями сильного размагничивающего поля [19]. Для того, чтобы скомпенсировать это размагничивающее поле при намагничивании сердечника, необходимо затратить дополнительный ток.

При импульсном режиме работы, в качестве обычного тока намагничивания учитывается ток, который называют кажущийся ток намагничивания $I_k > I_\mu$. Возрастание кажущегося намагничивающего тока несет за собой кажущееся уменьшение магнитной проницаемости магнитопровода, $\mu_k < \mu$.

Кажущаяся проницаемость магнитного материала зависит от толщины ленты сердечника $\delta_{\text{ж}}$ и длительности импульса $\tau_{\text{и}}$. Относительная кажущаяся проницаемость это функция отношения длительности импульса к вихревой постоянной времени θ_B :

$$\mu_k = f\left(\frac{\tau_{\text{и}}}{\theta_B}\right), \quad (13)$$

где

$$\theta_{\text{в}} = \frac{\mu_{\Delta} \cdot \delta_{\text{ж}}^2}{\pi \cdot 10^3 \cdot \rho_{\text{ж}}};$$

$\delta_{\text{ж}}$ - толщина листов сердечника, см; $\rho_{\text{ж}}$ - удельное электрическое сопротивление, Ом·см; μ_{Δ} - магнитная проницаемость на частном цикле петли гистерезиса.

Помимо учета влияния размагничивающего поля вихревых токов, необходимо учесть то, что по сечению листа магнитный поток распределяется неравномерно, за счет этого максимальное приращение $\Delta B_{\text{м}}$ превышает среднюю величину приращения на поверхности материала, которая определяется из формулы (9).

Отношение максимальной величины приращения индукции на поверхности листа к среднему приращению по сечению листа в зависимости от $\tau_{\text{и}}$ определяется по формуле

$$\frac{\Delta B_{\text{м}}}{\Delta B_{\text{ср}}} = 1 + \Delta B_{\text{ср}} \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \cdot \left(\frac{\pi^2}{3} - 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \cdot e^{-k^2 \tau_{\text{и}}} \right). \quad (14)$$

Например, при $t_{\text{и}} = 0,2$ $\Delta B_{\text{м}} \approx 10 \Delta B_{\text{ср}}$. Такое большое значение $\Delta B_{\text{м}}$ является причиной дополнительного увеличения тока намагничивания и снижает величину $\mu_{\text{к}}$. В общем говоря, точный расчет $\mu_{\text{к}}$ весьма затруднителен и в большинстве случаев действующее значение магнитной проницаемости определяют экспериментально. В [20] Отметим, что указанные значения магнитной проницаемости $\mu_{\text{к}}$ и максимальной величины $\Delta B_{\text{м}}$, относятся к части характеристики намагничивания с наибольшей крутизной. Для осуществления работы на этой части характеристики необходимо вводить подмагничивание, что приводит к дополнительным трудностям, которые связаны с разделением подмагничивающей обмотки от воздействия высокого импульсного напряжения, и еще со снижением влияния паразитных параметров.

Величины магнитной проницаемости $\mu_{\text{к}}$ и приращения магнитной

индукции ΔB_m , на петле гистерезиса, а именно, на ее частном цикле, для сплавов из пермаллоя резко снижается, во время работы без подмагничивания.

Ферритовые материалы и их характеристики. Из ферритов наиболее подходящим по размерам кольца и физическим характеристикам является никель-цинковый феррит. При частоте выше гиромангнитной частоты спина электронов $f_{гр}$ магнитная проницаемость материалов из феррита идет на спад [21-22]:

$$f_{гр} = \frac{g \cdot B_m}{\mu}, \quad (15)$$

где $g=2 \cdot 10^{10}$ 1/Тл·с.

На рисунке 2.4 изображена зависимость $\mu = F(f)$ для ферритовых материалов с различной величиной μ . Исходя из кривых на графике можно сделать вывод, что никель-цинковый феррит с $\mu = 1000$ наиболее хорош, для выполнения магнитопроводов. Этому ферриту тождественен феррит типа Ф1-1000 ($B_m = 0,25$ Тл, $\mu = 1000$). Граничная частота для феррита типа Ф1-1000 (формула 15) соответствует 6 МГц. В случае трансформации импульса при $\tau_{\phi} = 0,2 \cdot \tau_{и}$ и верхняя граничная частота для $\tau_{и} = 2 \cdot 10^{-7}$ секунд определяется по формуле (16).

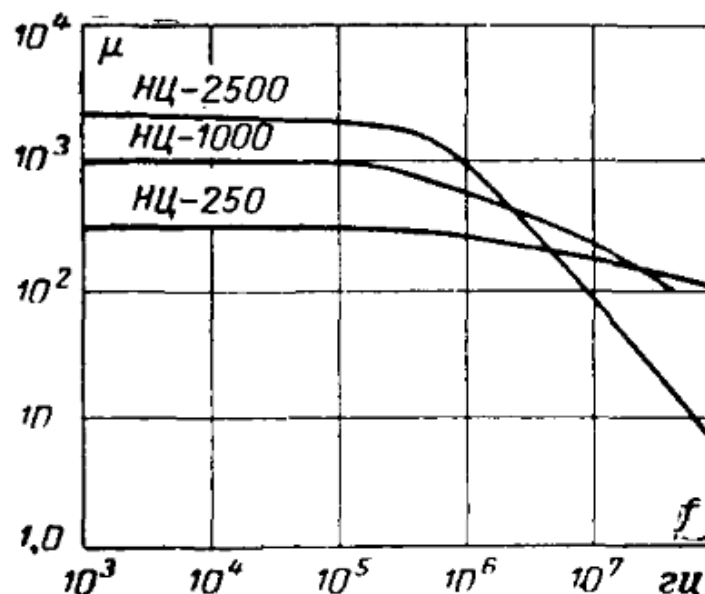


Рисунок 2.4 — Зависимость магнитной проницаемости от частоты

$$f_{\text{в}} = \frac{0,4}{\tau_{\text{ф}}} = \frac{0,4}{4 \cdot 10^{-8}} = 10 \text{ МГц.} \quad (16)$$

При этом магнитная проницаемость соответствует $\mu_{\text{в}} \approx 300$. Нижняя граничная частота определяется исходя из формулы (17)

$$f_{\text{н}} = \frac{1}{\tau_{\text{и}}} = 5 \text{ МГц.} \quad (17)$$

$\mu_{\text{н}}$ которое соответствует этой частоте равно приблизительно 500, Значение $\mu_{\text{в}}$ учитывается во время анализа переходного процесса при формировании фронта импульса. Значение $\mu_{\text{н}}$ учитывается во время анализа искажения вершины импульса.

Точнее значение μ при учете дополнительных эффектов магнитного воздействия и т. п. определяется экспериментально. Из полученных расчетным путем значений $f_{\text{гр}}$ следует, что никельцинковые ферриты нужно использовать при $\tau_{\text{и}} \geq 10^{-7}$ секунд.

2.5 Конструкция «кабельного» импульсного трансформатора

Магнитопровод «кабельного» импульсного трансформатора состоит из отдельных ферритовых колец. Для того, чтобы исключить влияние растрескивания колец во время намотки кабеля, между кольцами укладывают прессшпан. На торцевые части крайнего кольца сердечника наложены кольца из изоляционного материала, которые имеют радиус закругления, который исключает возможность изломить кабель. Для того, чтобы уменьшить изоляционные расстояния, обмотки выполняют одним кабельным отрезком с последующим секционированием оплетки. А вторичная обмотка (жила) не выполняется без разрыва изоляции по всей длине. Пример конструкции импульсного трансформатора с коэффициентом трансформации $n = 3$ приведен на рисунке 2.5. Трансформатор сконструирован на десяти никельцинковых ферритовых кольцах 120×80 мм.

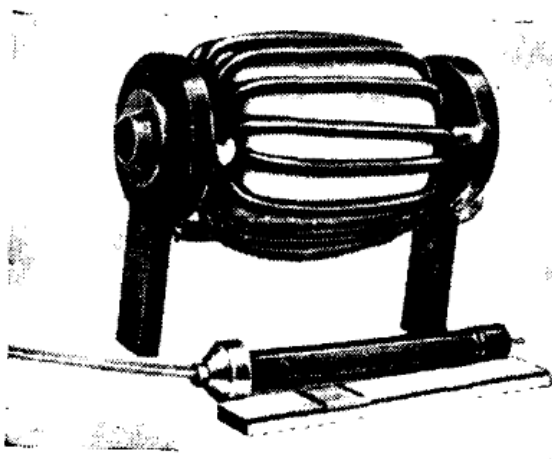


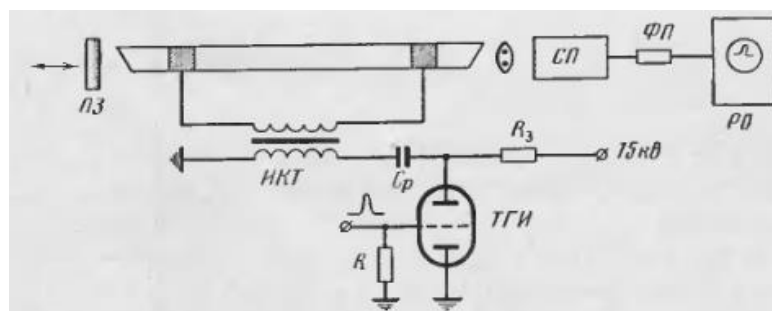
Рисунок 2.5 — «кабельный» импульсный трансформатор с тремя отрезками кабеля $n = 3$, мощность 15 МВт на напряжение 50 кВ, длительность импульса 100 нс

Чтобы достичь минимальных габаритов трансформатор укреплен на высоковольтном импульсном разъеме, который выполнен из изоляционного материала.

2.6 Цели использования кабельного импульсного трансформатора

Импульсные трансформаторы используются в блоках возбуждения лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов либо с целью (1) увеличения напряжения на электродах газоразрядной трубки (ГРТ), либо (2) в сочетании с корректирующими элементами разрядного контура с целью коррекции формы импульса напряжения на электродах ГРТ, либо (3) с целью согласования сопротивления разряда с выходным сопротивлением блока возбуждения.

1) Для питания лазера на самоограниченных переходах атомов металлов требуются импульсы возбуждения, имеющие короткую длительность и крутой фронт нарастания. Для этого в нашей работе использовалась система, основанная на использовании кабельного импульсного трансформатора. Схема питания вместе с разрядной трубкой приведена на рисунке 2.6.



ПЗ – передвижное зеркало; СП – спектральный прибор; ФП – фотоприемник; РО – регистрирующий осциллограф; ТГИ – коммутирующий тиратрон; ИКТ – импульсный кабельный трансформатор; C_p – накопительный конденсатор.

Рисунок 2.6 – Схема питания разрядной трубки с помощью ИКТ с использованием конденсатора в качестве накопителя энергии

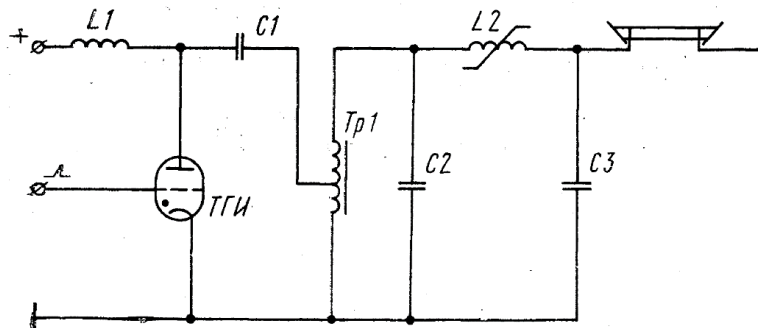
На первичную обмотку ИКТ, через тиратрон, разряжается накопительная ёмкость, вторичная обмотка этого трансформатора подключена к электродам разрядной трубки. Использование повышающего трансформатора с определенным коэффициентом трансформации дает повышенное напряжение на электродах ГРТ, это способствует улучшению генерации лазерного излучения [23].

2) Коррекция формы импульса напряжения на электродах ГРТ

В настоящее время промышленностью выпускаются отпаянные активные элементы лазера на парах меди (ЛПМ) с минимальной наработкой до 1000 ч и имеющие начальную среднюю мощность 1-15 Вт. Питающие схемы и конструктив таких элементов описан в [24, 25]. Достижение длительного ресурса работы происходит за счет повышения давления буферного газа. В [24] отмечается, что основной причиной относительно низких КПД и средней мощности лазера является не оптимальность условий его электрического возбуждения. При использовании питающего генератора, разрядный контур которого содержит водородный тиратрон ТГИ, накопительный конденсатор и разрядную трубку лазера, импульсы возбуждающего тока имеют длительность фронта (60 — 100) нс и общую длительность (200 — 250) нс.

Для повышения КПД лазера необходимо уменьшить длительность фронта импульса тока до (20 — 30) нс и общую длительность до (40 — 60) нс, чтобы длительность возбуждения приравнять длительности существования инверсии [26, 27]. Такие параметры невозможно получить в схеме питания с использованием только тиратрона, потому что он не может коммутировать большую среднюю мощность во время работы с импульсами возбуждения малой длительности, которые имеют большую частоту повторения. В [25] при давлении буферного газа (неона) 250 мм рт. ст. в результате сильного формирования режима работы тиратрона была получена средняя мощность около 15 Вт, при этом срок службы этого тиратрона падал до 100 ч.

Для того, чтобы уменьшить длительность фронта импульса и всего импульса в целом, и для увеличения его амплитуды последовательно с тиратроном включают повышающий автотрансформатор сердечник которого выполнен из феррита (коэффициент трансформации 1:2. Принципиальная схема приведена на рисунке 2.7.



$L1$ – индуктивность; $C1$ – рабочая емкость; $Тр1$ – импульсный трансформатор; $ТГИ$ – коммутирующий тиратрон; $L2$ – нелинейный дроссель;
 $C2$ – обостряющий конденсатор

Рисунок 2.7 – Принципиальная схема питающего генератора с кабельным импульсным автотрансформатором

Оплетка и центральная жила соединяются последовательно. Изоляция от ферритового сердечника и между витками выполнена с помощью фторопластовых колец с пазами. Трансформатор имеет воздушное

принудительное охлаждение [28].

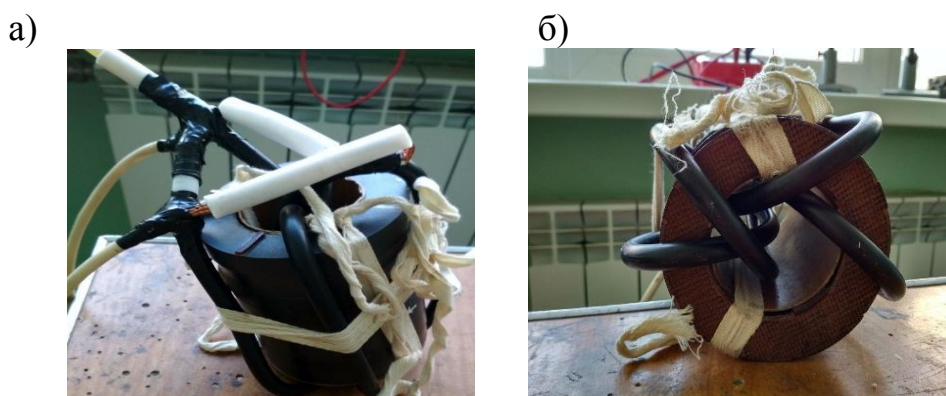
3) Согласование сопротивления разряда с выходным сопротивлением блока возбуждения.

Импульсный трансформатор используется как составной элемент для генераторов электрических импульсов различных типов, и служит согласующим звеном между этим генератором и нагрузкой. Условия передачи импульсной энергии характеризуются параметрами генератора и автотрансформатора. Исходя из этого во время проектирования трансформатора необходимо учесть, как параметры генератора, так и параметры нагрузки. Так же трансформатор обеспечивает задержку между током и напряжением при сохранении длительности импульса генерации. То есть к ГРТ приложена разность потенциалов в то время как ток начинает увеличиваться с задержкой. Это обеспечивает лучшее возбуждение электронов [29].

Глава 3. Расчет параметров кабельного импульсного автотрансформатора.

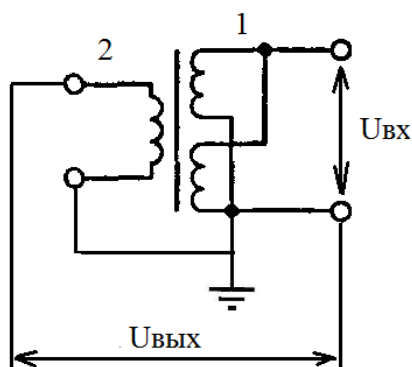
3.1 Общий вид автотрансформатора

Рабочая модель кабельного автотрансформатора показана на рисунке 3.1. Сердечник автотрансформатора состоит из 8 ферритовых колец. Тип феррита 2000 НМ с габаритами 100х60х15 мм. Обмотка выполнена из кабеля типа РК 50-7-11. Первичная обмотка оплётка кабеля, состоящая из двух отрезков, вторичная обмотка жила кабеля. Автотрансформатор включается в цепь между ГРТ и схемой накачки лазера



а) – вид сбоку; б) – вид сзади

Рисунок 3.1 – Модель кабельного автотрансформатора



1- первичная обмотка (оплетка кабеля); 2-вторичная обмотка (жила кабеля);
 $U_{вх}$ - напряжение на входе автотрансформатора; $U_{вых}$ – напряжение на выходе автотрансформатора

Рисунок 3.2 – Схема соединения обмоток кабельного импульсного автотрансформатора

3.2 Техническое задание для расчета

Параметры импульсов источника (предельные параметры, подаваемые на вход автотрансформатора):

$\tau_{\text{имп}}$ = до 300 нс, - длительность импульса;

$\tau_{\text{ф}}$ - не более 60 нс, - длительность фронта;

U_m = 10 кВ - амплитуда напряжения;

I_m = 200 А - амплитуда тока;

f не боле 50 кГц - частота повторения импульсов;

C_T = 1650 пФ - емкость, разряжаемая на ГРТ (газоразрядная трубка).

Параметры, которые необходимо получить при установке рассчитываемого кабельного импульсного автотрансформатора. (Параметры на выходе системы):

U_m не менее 15 кВ.

$\tau_{\text{ф}}$ - не более 40 нс, - длительность фронта.

3.3 Выбор кабеля для обмотки

В качестве обмотки для кабельного импульсного автотрансформатора возьмем кабель РК50-7-11 [30].

Проверка кабеля по изоляции:

Изоляция кабеля между жилой и оплеткой выполнена из полиэтилена. Электрическая прочность полиэтилена на 1 мм составляет 40 кВ при постоянном напряжении [31]. При импульсном напряжении 78 кВ/мм.

Толщина изоляции кабеля равна 2,485 мм. Отсюда следует, что электрическая прочность между жилой и оплеткой составляет 193,83 кВ. Напряжение на выходе трансформатора исходя из расчетов доходит до 30 кВ. Следовательно, кабель РК50-7-11 подходит для выполнения обмотки кабельного импульсного автотрансформатора. Изображение кабеля приведено на рисунке 3.3.

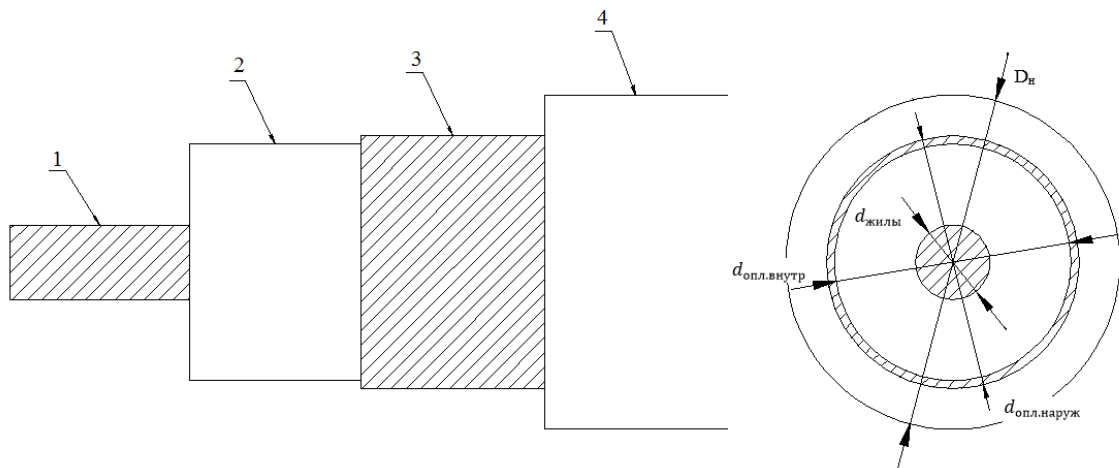
Технические характеристики кабеля:

Волновое сопротивление: $\rho_0 = 50 \text{ Ом}$;

Погонная емкость: $C_0 = 100 \text{ пФ/м}$;

Погонная индуктивность:

$$L_0 = C_0 \cdot \rho_0^2 = 100 \cdot 10^{-12} \cdot 50^2 = 0.25 \left[\frac{\text{мкГн}}{\text{м}} \right].$$

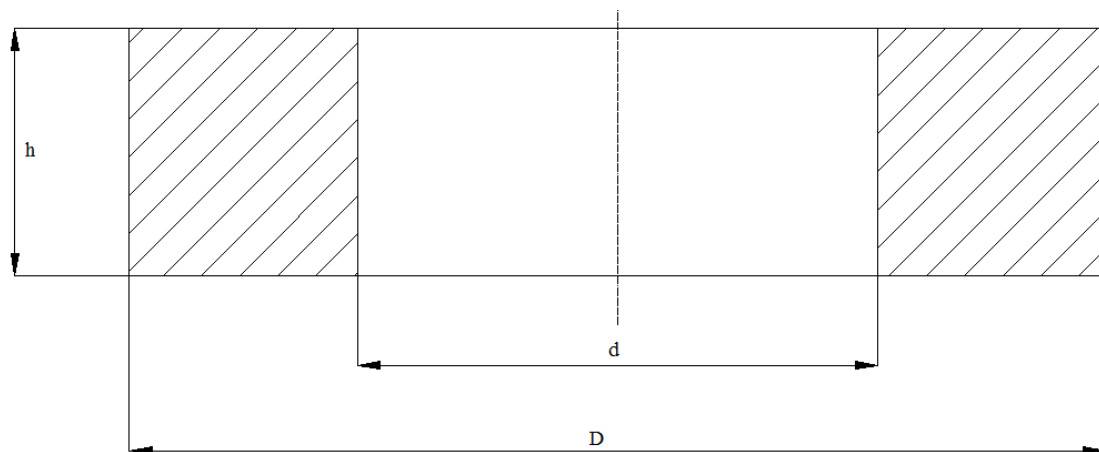


1-Жила; 2-изоляция (полиэтилен); 3-оплетка; 4-изоляция (светостабилизированный полиэтилен). Наружный диаметр кабеля: $D_n = 10,0 \pm 0,3$ мм; Диаметр внутренней жилы: $d_{\text{жилы}} = 2,28$ мм; Внутренний диаметр оплетки: $d_{\text{опл.внутр}} = 7,25 \pm 0,15$ мм; Наружный диаметр оплетки: $d_{\text{опл.наруж}} = 7,4$ мм; Толщина оплетки: $t = 0.15$ мм

Рисунок 3.3 – вид и сечение коаксиального кабеля РК50-7-11

3.4 Выбор сердечника для автотрансформатора

Исходя из вышеизложенной теории, выбираем кольцевой ферритовый сердечник, для того чтобы снизить паразитные параметры и задействовать всю площадь магнитопровода. Возьмём ферритовое кольцо 2000 НМ (марганцево-никелевый) с габаритами 100x60x15 [32-33]. Величина размаха магнитной индукции 0,39 Тл и проницаемость $\mu = 1000$. Габариты феррита приведены на рисунке 3.4.



D – Наружный диаметр сердечника (100 мм); d – внутренний диаметр сердечника (60 мм); h – толщина сердечника (15 мм)

Рисунок 3.4 – Габариты феррита 2000НМ (мм)

Расчёт площади кольца:

$$S_{\text{кольца}} = (D - d) \cdot \frac{h}{2} = (10 - 6) \cdot \frac{1,5}{2} = 3 \text{ [см}^2\text{]}.$$

Расчет длины средней силовой линии кольца магнитопровода:

$$l_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot (D - d)}{2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (10 - 6)}{2} = 12,566 \text{ [см]}.$$

Расчет числа витков первичной обмотки:

$$\omega_1 = \frac{U_{\text{вх}} \cdot \tau_{\text{и}}}{\Delta B \cdot S_{\text{серд}} \cdot K_{\text{ст}}} \cdot 10^4 = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^{-9}}{0,39 \cdot 3 \cdot 0,95} \cdot 10^4 = 26,99 \approx 27 \text{ витков}.$$

Конструктивно невозможно намотать 27 витков коаксиальным кабелем на ферритовое кольцо. Поэтому необходимо взять несколько колец для того, чтобы уменьшить количество витков.

Пересчет числа витков первичной обмотки на сердечник из 8 ферритов:

$$\omega_1 = \frac{U_{\text{вх}} \cdot \tau_{\text{и}}}{\Delta B \cdot S_{\text{кольца}} \cdot K_{\text{ст}} \cdot k} \cdot 10^4 = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^{-9}}{0,39 \cdot 3 \cdot 0,95 \cdot 8} \cdot 10^4 = 3,37 \approx 4 \text{ витка}.$$

где k – количество колец;

$K_{ст}$ - коэффициент стали.

Индуктивность намагничивания

$$L_{\mu} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot \omega_1^2 \cdot S_{\text{кольца}}}{l_0} \cdot \mu = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot 2^2 \cdot 3}{12,566} \cdot 1000 = 12 \text{ [нГн]}.$$

Индуктивность рассеяния вторичной обмотки, приведенная к виткам первичной обмотки

$$L = \frac{L_0 \cdot l_k}{n} = \frac{0,25 \cdot 10^{-6} \cdot 2}{2} = 0,25 \text{ [мкГн]}.$$

где n – количество отрезков кабеля;

$l_k = 200$ см – Длина кабеля.

Индуктивность первичной обмотки $L_1 = 27$ [мкГн] (экспериментальные данные);

Индуктивность вторичной обмотки $L_2 = 110$ [мкГн] (экспериментальные данные);

Исходя из отношения количества витков первичной и вторичной обмоток коэффициент трансформации автотрансформатора равен 2

$$K_{тр} = \frac{N_2}{N_1},$$

где N_1 – число витков первичной обмотки;

N_2 – число витков вторичной обмотки.

$$K_{тр} = \frac{4}{2} = 2.$$

Зная, экспериментально полученные индуктивности обмоток, проверим реальный коэффициент трансформации автотрансформатора:

$$K_{тр} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}},$$

где L_1 – индуктивность первичной обмотки;

L_2 – индуктивность вторичной обмотки.

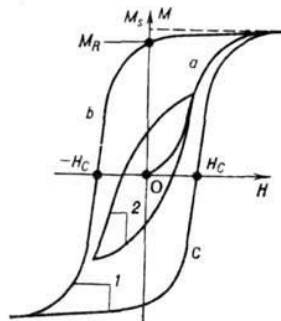
$$K_{тр} = \sqrt{\frac{110}{27}} = 2.$$

Внутри ферритового сердечника вставлен цилиндр из изоляционного картона, на крайних кольцах сердечника наклеены накладки из текстолита для защиты кабеля от повреждений острыми краями кольца.

3.5 Потери в сердечнике автотрансформатора

Потери в сердечнике трансформатора имеют две составляющие: потери на вихревые токи и потери на циклическое перемагничивание.

Автотрансформатор работает в условиях слабых циклических магнитных полей. Следовательно, при намагничивании ферритового сердечника индукция B не достигает максимального значения B_s , то есть процесс можно описать частной петлей гистерезиса. Совокупность вершин петель гистерезиса образует основную кривую намагничивания [34], изображенную на рисунке 3.5.



1 – максимальная петля гистерезиса; 2 - петля гистерезиса частного цикла; а - кривая намагничивания; b и c-кривые перемагничивания; M_R - остаточная намагниченность; H_C - коэрцитивная сила; M_S - намагниченность насыщения

Рисунок 3.5 – Петля гистерезиса

Расчет потерь в сердечнике [35]

Удельные потери для ферритов, работающих на частотах 5-50 кГц:

$$P_{уд} = 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot f^{1.31} \cdot B_m^{2.49} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right].$$

где f – рабочая частота, Гц ;

B_m – максимальная магнитная индукция для феррита, Тл.

Для расчета используем частоту $f = 7,22$ кГц, $B_m = 0,39$ Тл.

$$P_{уд} = 1,64 \cdot 10^{-3} \cdot (7,22 \cdot 10^3)^{1,31} \cdot 0,39^{2,49} = 17,837 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \right].$$

Потери в сердечнике:

$$\Delta P_c = P_{уд} \cdot M [\text{Вт}].$$

где $P_{уд}$ – удельные потери для ферритов;

M – Масса феррита, кг.

Масса феррита:

$$M = \rho \cdot V, [\text{кг}].$$

где ρ – плотность феррита, $\rho = 4,8 \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]$;

V – объем сердечника $[\text{см}^3]$.

Объем ферритового кольца находим через площадь кольца и его высоту

$$V = S_0 \cdot h = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h, [\text{см}^3];$$

где S_0 – площадь кольца феррита;

d – внутренний диаметр кольца сердечника;

h – высота кольца сердечника.

$$V = \frac{3,14 \cdot 6^2}{4} \cdot 1,5 = 42,39 [\text{см}^3];$$

Так как сердечник состоит из 8 ферритовых колец то общая площадь сердечника составляет 339,12 $[\text{см}^3]$.

$$M = 4,8 \cdot 339,12 = 1627,78 \text{ г} = 1,628 [\text{кг}].$$

$$\Delta P_c = 17,837 \cdot 1,628 = 28,95 [\text{Вт}].$$

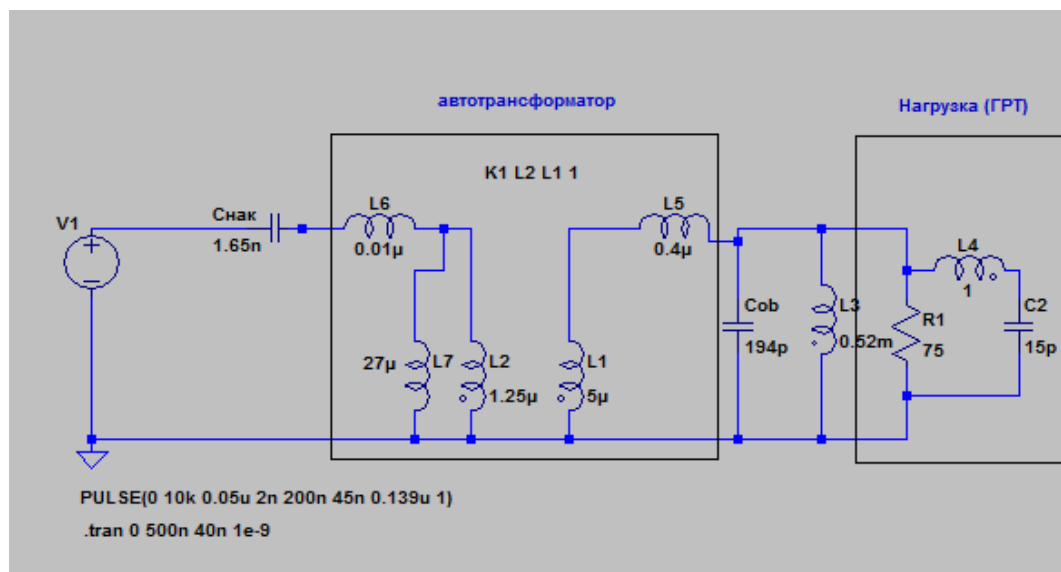
3.6 Моделирование схемы накачки лазера с автотрансформатором

Моделирование проводилось в программной среде LTSpice. Программа предназначена для моделирования электрических цепей на переменном,

постоянном и импульсном напряжении.

В схеме, приведённой на рисунке 3.6 изображены элементы необходимые для моделирования.

Модель использовалась для определения емкости обостряющего конденсатора. Обостряющий конденсатор нужен для того чтобы увеличить di/dt в трубке [36]. Обостряющий конденсатор выбирается из условия, что время его заряда должно быть сопоставимо с временем задержки между током и напряжением. Зная время задержки, мы подбирали необходимую ёмкость. Параметры элементов схемы были взяты из экспериментальных данных приведенных в главе 4. Модель не использовалась для сравнения с реальной установкой и экспериментально полученными данными так как затруднительно смоделировать схему замещения ГРТ потому, что ее параметры изменчивы в разные моменты времени.



V1 – Источник заряда емкости; $C_{\text{нак}}$ – разрядная емкость; L1, L2, L5, L6, L7 – индуктивности для имитации нелинейного трансформатора; Cob – обостряющий конденсатор; L3 – индуктивность дросселя; L4, R1, C2 – параметры нагрузки (газоразрядной трубки)

Рисунок 3.6 – Модель схемы разряда источника питания на ГРТ с автотрансформатором

Время задержки между током и напряжением определялось из

осциллограмм как показано на рисунке 3.7

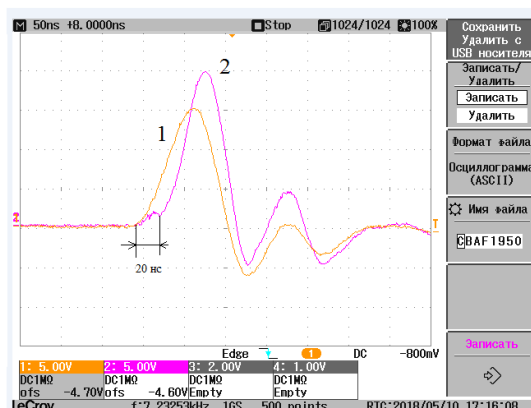


Рисунок 3.7 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ

Задержка между током и напряжением составила 20 нс. При подборе конденсатора сделали вывод, что наилучшим вариантом будет использование емкости 194 пФ, так как время заряда, исходя из осциллограммы на рисунке 3.8, составило 20 нс.

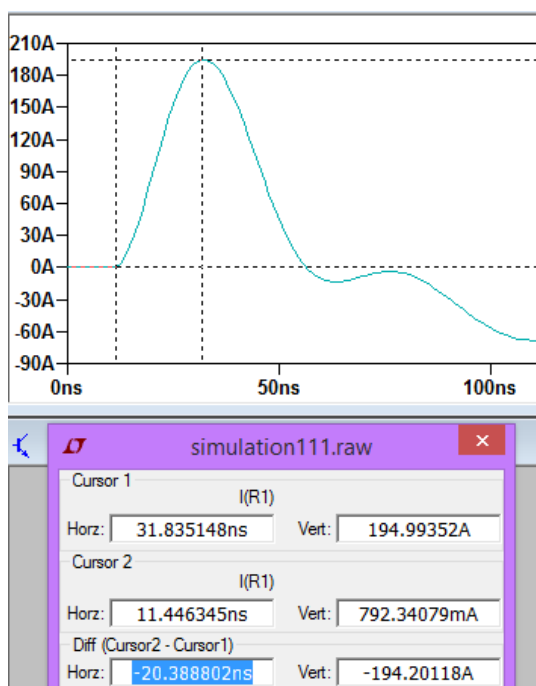
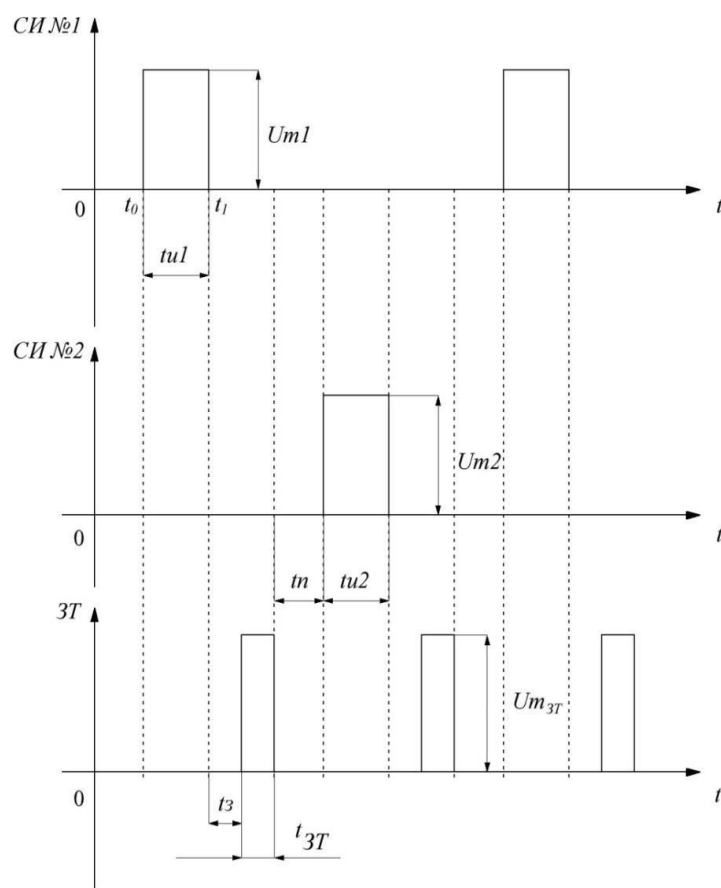


Рисунок 3.8 – Осциллограмма тока на конденсаторе емкостью 194 пФ в схеме накачки лазера с использованием автотрансформатора

Вывод:

На основании компьютерной модели выбрали необходимую емкость обостряющего конденсатора. Для запасаения большей энергии в обостряющем конденсаторе используется кабельный импульсный автотрансформатор так как энергия, запасаемая в конденсаторе, равняется $W = C \cdot U^2/2$. Если не использовать автотрансформатор, то для получения большой величины энергии придётся увеличивать емкость конденсатора, а это приведет к увеличению его габаритов, увеличению времени заряда.

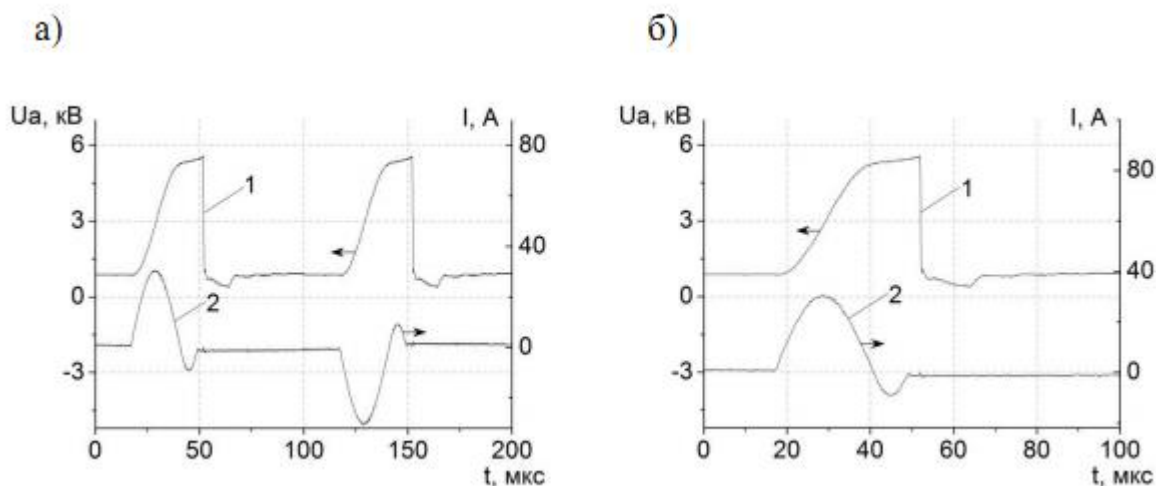
75 У4 (АТ), который позволяет варьировать величину входного напряжения. Переменный сигнал выпрямляется, отфильтровывается и прикладывается к полумостовому инвертору, выполненному на мощных IGBT-транзисторах. В момент времени t_0 , принятый за точку отсчета (см. рисунок 4.2), открывается транзистор $VT1$, и через него начинает протекать импульс тока, длительность которого подбирается таким образом, чтобы рабочая емкость $C4$ успевала зарядиться до максимального значения. Далее транзистор $VT1$ запирается в некоторый момент времени t_1 . После закрытия транзистора $VT1$ следует задержка (t_3) порядка нескольких микросекунд, после чего от системы управления приходит запускающий импульс на сетку тиратрона $VL1$.



СИ№1 и СИ№2 – серии импульсов №1 и №2 для открытия транзисторов $VT1$ и $VT2$ соответственно; 3Т – импульс запуска тиратрона

Рисунок 4.2 – Диаграммы работы системы управления

При коммутации тиратрона накопительный конденсатор $C3$ разряжается на газоразрядную трубку (ГРТ). Затем следует пауза (t_n), длительность которой задается с помощью системы управления (СУ). По окончании заданной паузы открывается транзистор $VT2$, и далее все процессы повторяются.



а) – временная развертка 25 мкс, б) – временная развертка 10 мкс

Рисунок 4.3 – Напряжение на аноде тиратрона и зарядный ток дросселя

На рисунке 4.3 приведены осциллограммы напряжения на аноде тиратрона и зарядный ток дросселя. Для минимизации динамических потерь в схеме коммутация тиратрона осуществляется в момент времени, когда ток дросселя спадает до нуля.

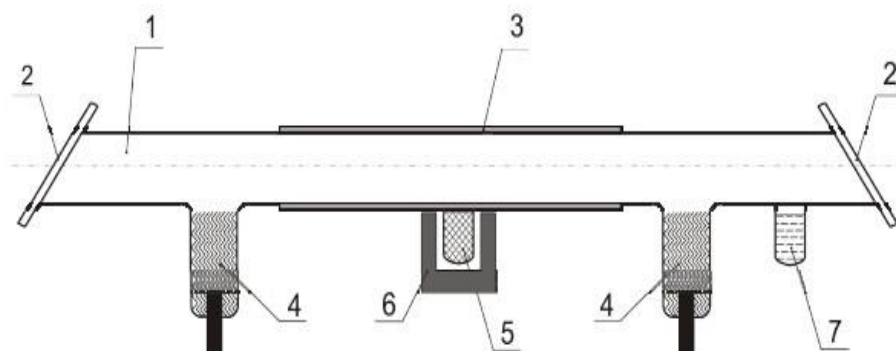
Конструкция активных элементов

На рисунке 4.4 приведена конструкция лазерного активного элемента.

ГРТ (1) и ее выходные окна (2) изготавливаются из кварцевого стекла в Института оптики атмосферы СО РАН. Для обеспечения требуемой температуры внешней стенки ГРТ (порядка 680 °С) используется специальный нагревательный элемент с теплоизолятором. На один из электродов (4) подается высокое напряжение, второй же электрод заземляется.

Активный объем ГРТ заполняется парами бромида меди, порошок которого помещен в отсек (5) и нагревается элементом (6) до температуры порядка 500 °С. Кроме того, в конструкции предусмотрен генератор HBr ,

который используется в качестве буферного газа [37]. Требуемые уровни рабочей температуры обеспечивает трехканальный терморегулятор.



1 – кварцевая трубка, 2 – выходные окна, 3 – нагревательный элемент с теплоизолятором, 4 – электроды, 5 – порошок бромида меди, 6 – нагревательный элемент, 7 – генератор HBr

Рисунок 4.4 – Конструкция активного элемента

Габаритные размеры ГРТ задающего генератора составили: длина активной зоны – 60 см, диаметр – 2,5 см.

Измерительное оборудование

Для регистрации осциллограмм токов и напряжения использовались цифровые четырехканальные осциллографы RIGOL (DS1074B) и LeCroy (WJ324 А). Высокое напряжение регистрировалось измерительным высоковольтным щупом Tektronics P6015A с коэффициентом деления 1000: 1. Электрический ток в схемах накачки регистрировался токовым кольцом Pearson Current Monitors 8450 с коэффициентом чувствительности 1:10 (В/А).

Для регистрации импульсов лазерного излучения использовались коаксиальные фотоэлементы ФЭК-22СПУ-М. Мощность излучения определялась посредством датчика Ophir 30C-SH.

4.2 Экспериментальная часть без генерации излучения

Полученные экспериментальные данные внесем в таблицы №4.1-4.5. По осциллограммам на рисунках 4.5-4.17 определяем максимальные ток и напряжение на ГРТ.

Емкость накачки и подаваемое напряжение

$$U_H = 9.5 \text{ [кВ]}$$

$$C_{\text{нак}} = \frac{3300 \cdot 3300}{6600} = 1650 \text{ [пФ]} = 1,65 \text{ [нФ]} ;$$

Эксперимент со схемой без трансформатора:

Таблица 4.1 – Повышение давления в ГРТ при схеме без автотрансформатора

Р,Торр	30	45	60	75	90
I, А	0,14	0,123	0,12	0,12	0,12
№ изм-я	86	85	84	83	82
№ осц.	39	38	37	36	35

Эксперимент с автотрансформатором и обостряющим конденсатором 132 [пФ]:

$$C_{\text{об}} = \frac{330 \cdot 220}{550} = 132 \text{ [пФ]};$$

Таблица 4.2 – Повышение давления в ГРТ при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 132 [пФ].

Р,Торр	30	45	60	75	90
I, А	0,15	0,14	0,13	0,125	0,122
№ изм-я	76	77	78	80	81
№ осц.	30	31	32	33	34

Эксперимент с автотрансформатором и обостряющим конденсатором 103 [пФ]:

$$C_{об} = \frac{132 \cdot 470}{602} = 103 \text{ [пФ]};$$

Таблица 4.3 – Повышение давления в ГРТ при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 103 [пФ].

Р, Торр	30	45	60	75	90
I, А	0,15	0,138	0,138	0,13	0,13
№ изм-я	87	88	89	90	91
№ осц.	40	41	42	43	44

Эксперимент с автотрансформатором и обостряющим конденсатором 163 [пФ]:

$$C_{об} = \frac{330 \cdot 300}{660} = 165 \text{ [пФ]};$$

Таблица 4.4 – Повышение давления в ГРТ при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 [пФ].

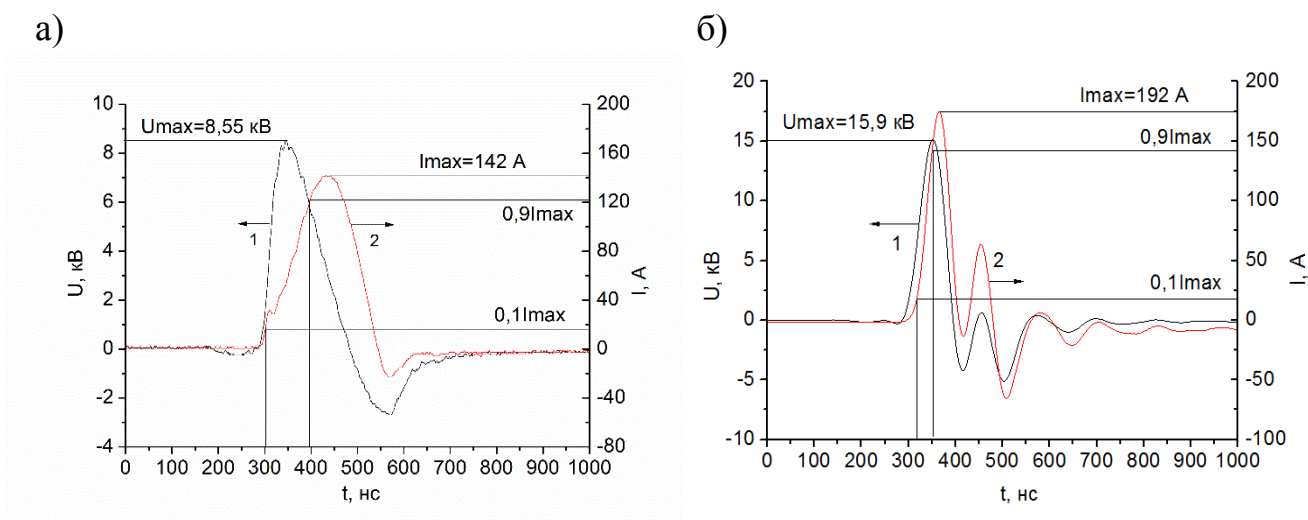
Р, Торр	30	45	60	75	90
I, А	0,14	0,12	0,12	0,125	0,13
№ изм-я	96	95	94	93	92
№ осц.	49	48	47	46	45

Эксперимент с автотрансформатором и обостряющим конденсатором 194 [пФ]:

$$C_{об} = \frac{330 \cdot 470}{800} = 194 \text{ [пФ]};$$

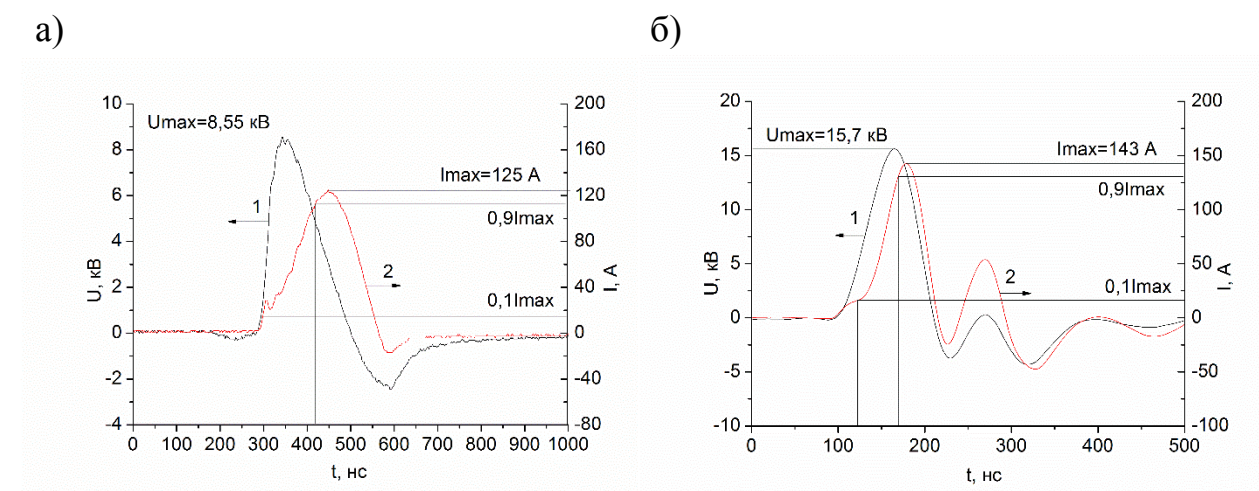
Таблица 4.5 – Повышение давления в ГРТ при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 194 [пФ].

Р, Торр	30	45	60	75	90
I, А	0,14	0,125	0,12	0,125	0,125
№ изм-я	97	98	99	500	1
№ осц.	50	51	52	53	54



а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 132 [пФ]

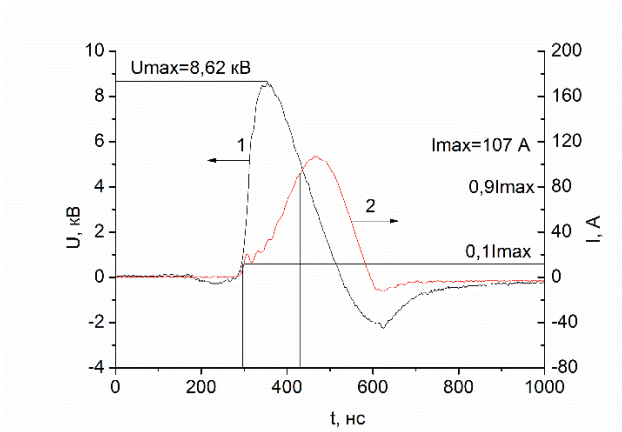
Рисунок 4.5 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 30 торр



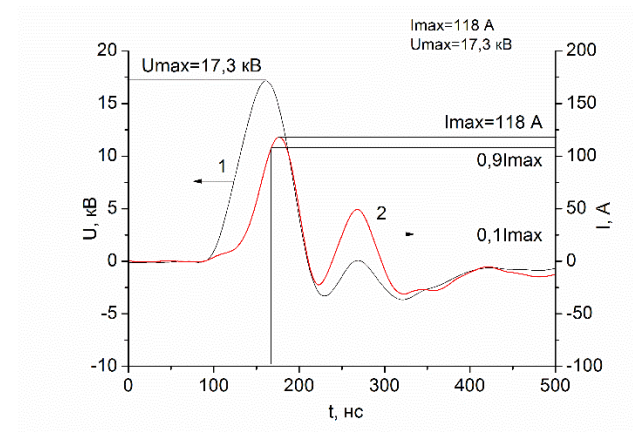
а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 132 [пФ]

Рисунок 4.6 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 45 торр

а)



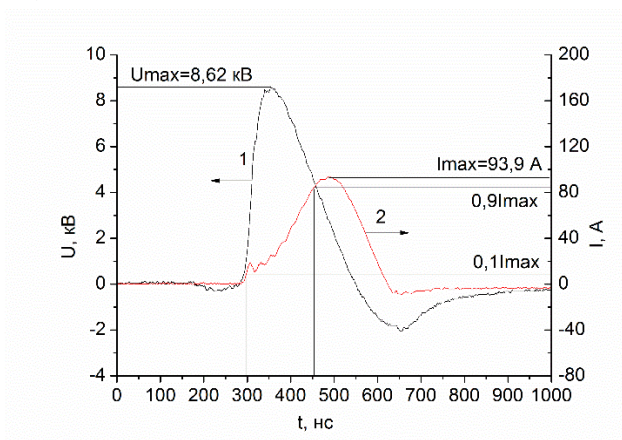
б)



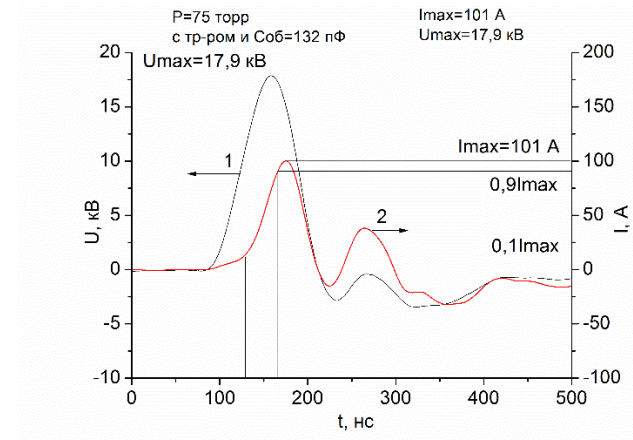
а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 132 [пФ]

Рисунок 4.8 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 60 торр

а)

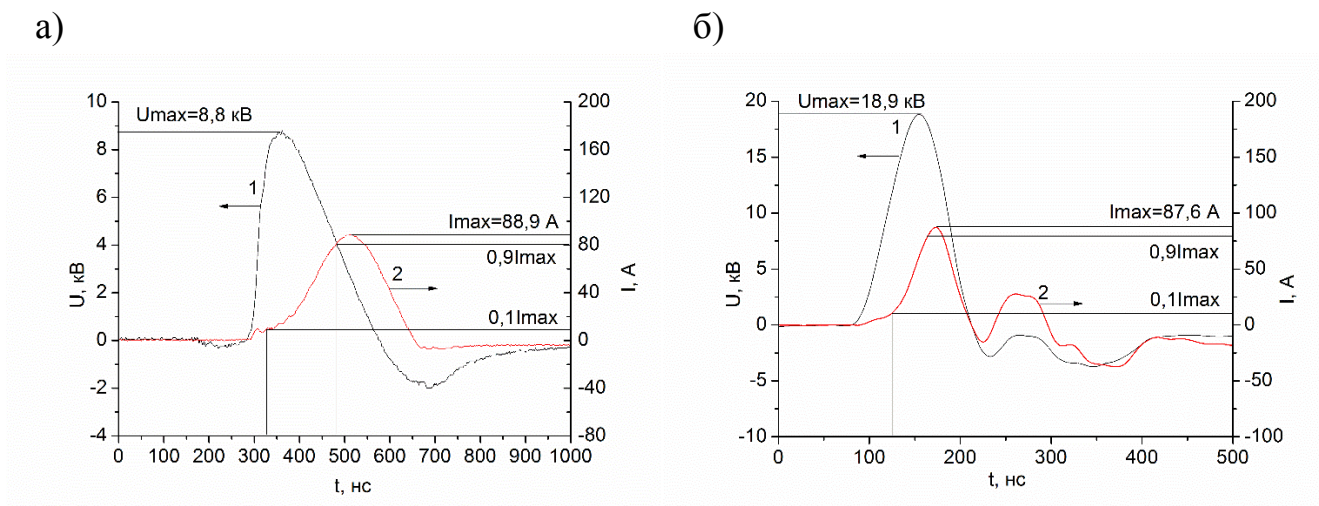


б)



а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 132 [пФ]

Рисунок 4.9 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 75 торр

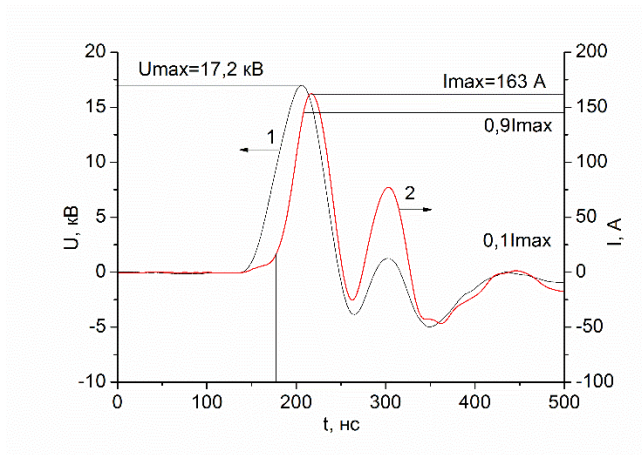


а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 132 [пФ]

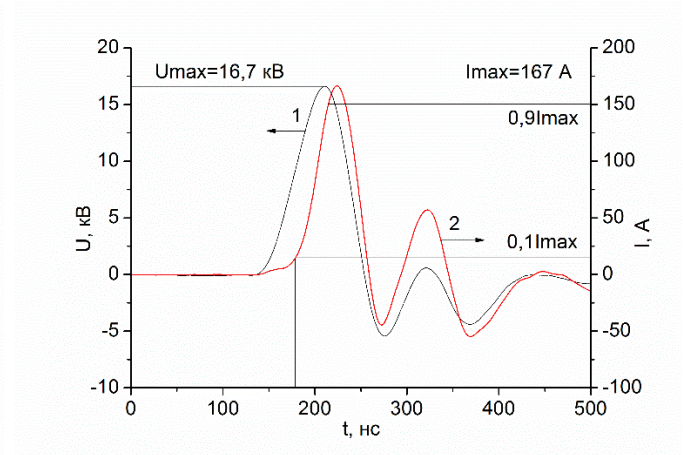
Рисунок 4.10 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 90 торр

Исходи из рисунков 4.5-4.10 можно сделать вывод, что при увеличении давления в ГРТ значение тока снижается, это обусловлено тем что увеличивается сопротивление канала пробоя, при этом мы наблюдаем небольшой рост напряжения.

а)

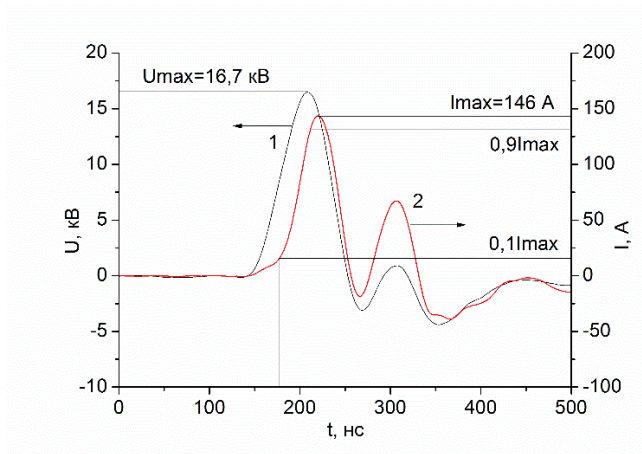


б)

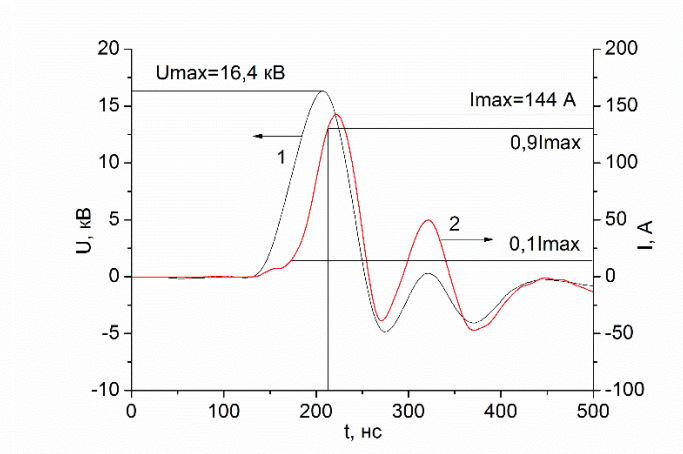


а) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 103 пФ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 пФ
Рисунок 4.11 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 30 торр

а)

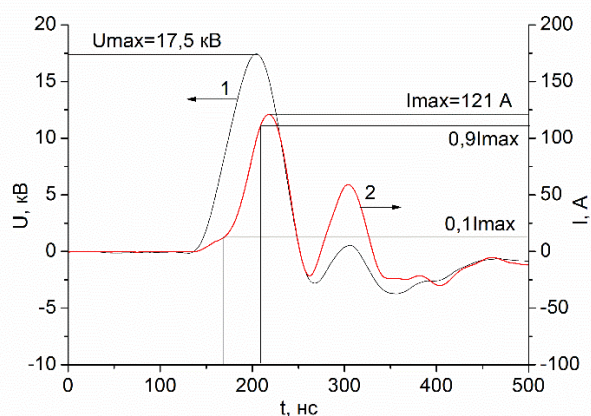


б)

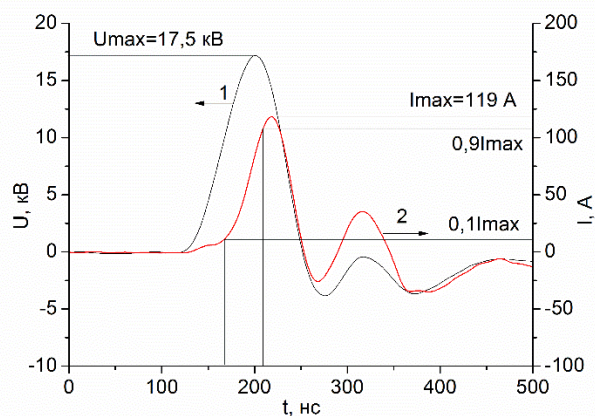


а) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 103 пФ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 пФ
Рисунок 4.12 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 45 торр

а)

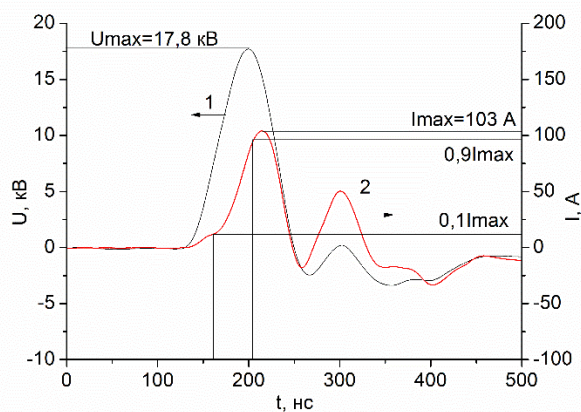


б)

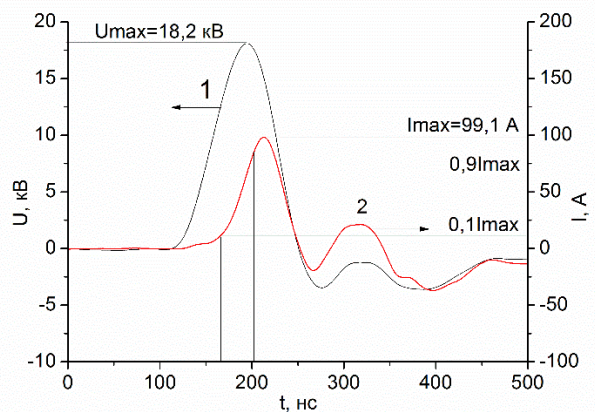


а) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 103 пФ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 пФ
Рисунок 4.13 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 60 торр

а)

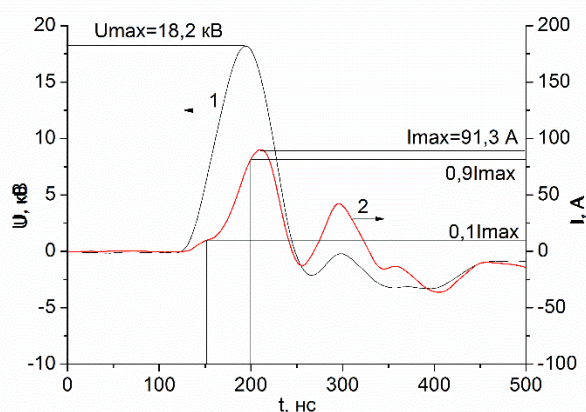


б)

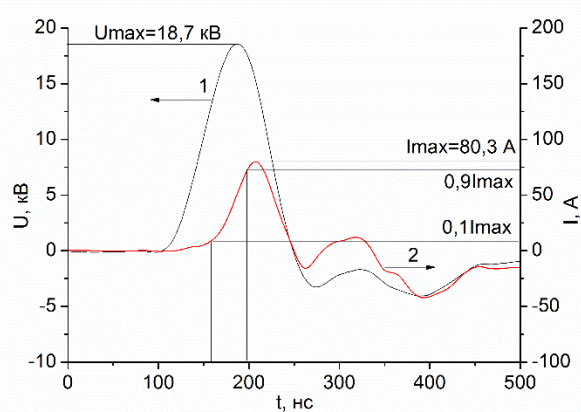


а) осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 103 пФ; б) осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 пФ.
Рисунок 4.14 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 75 торр

а)



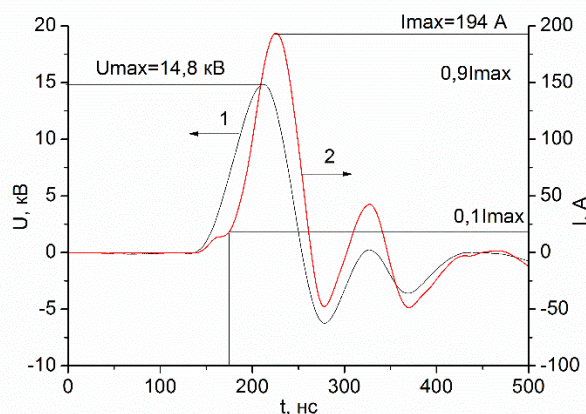
б)



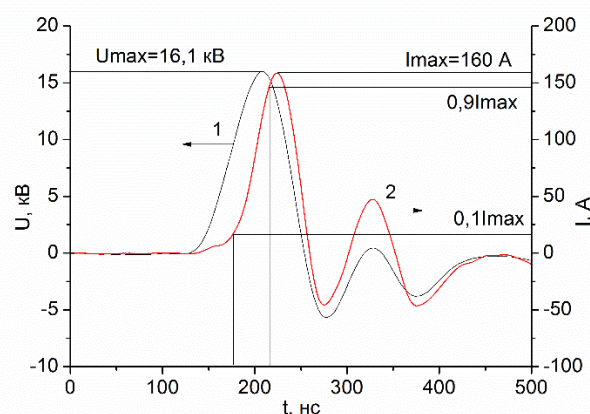
а) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 103 пФ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 [пФ]

Рисунок 4.15 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при давлении 90 торр

а)

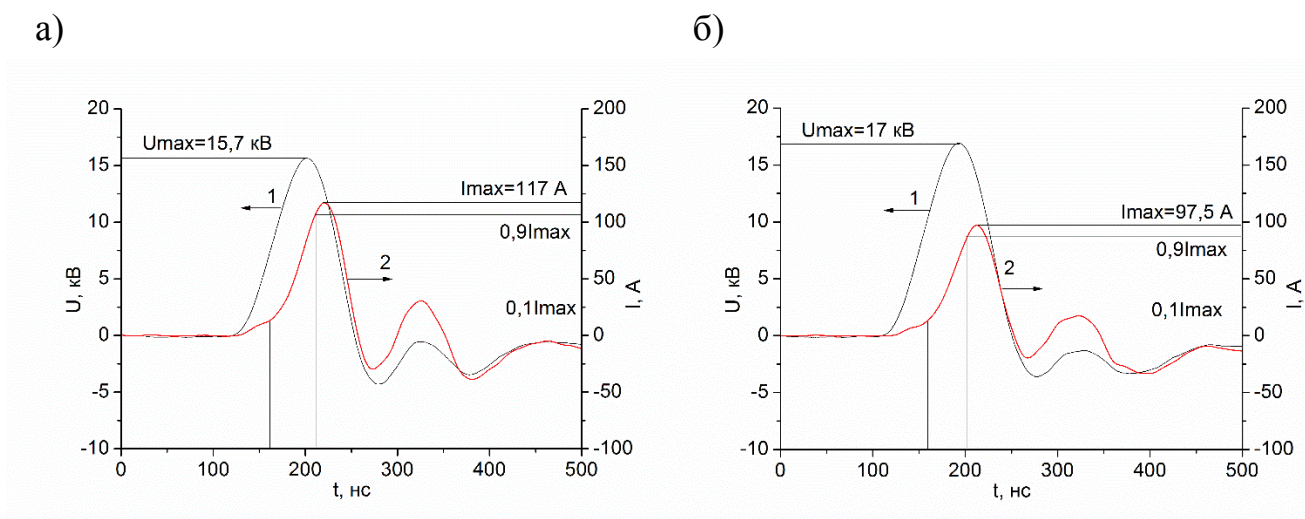


б)



а) – осциллограмма при давлении 30 торр; б) – осциллограмма при давлении 45 торр

Рисунок 4.16 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 194 [пФ]



а) – осциллограмма при давлении 60 торр; б) – осциллограмма при давлении 75 торр

Рисунок 4.17 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 194 [пФ]

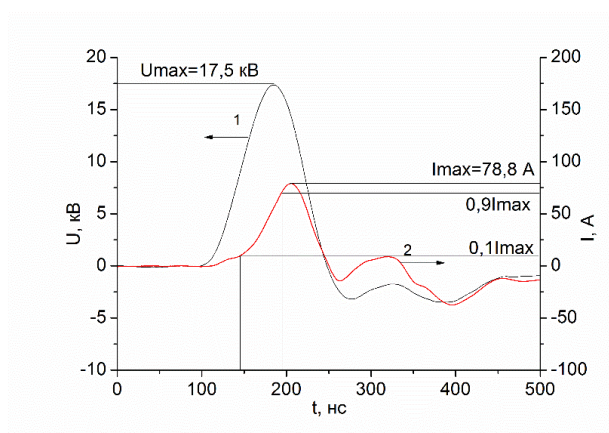
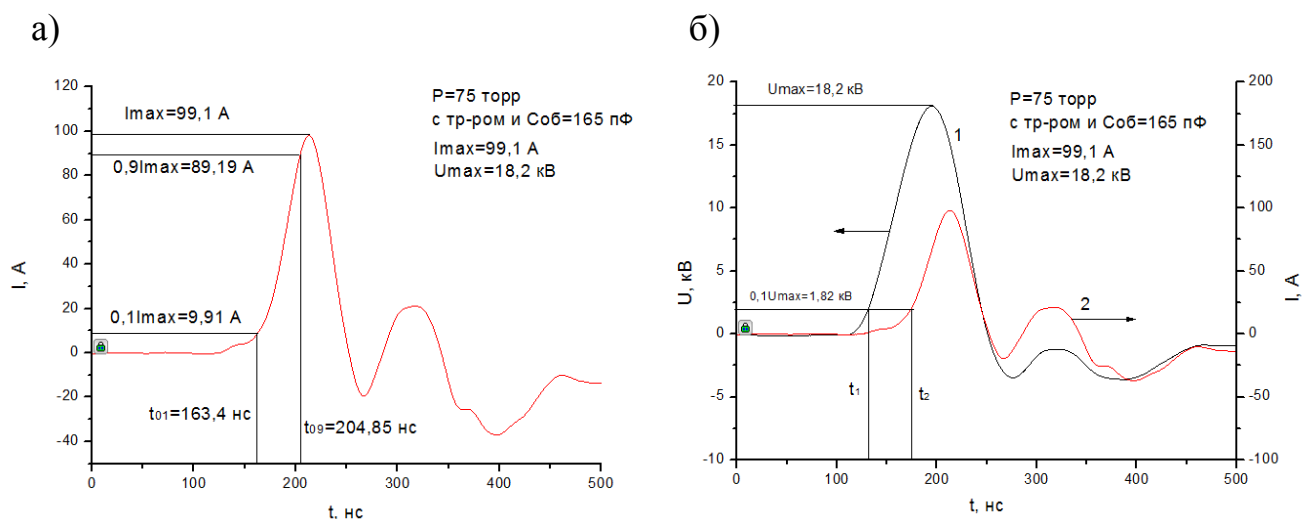


Рисунок 4.18 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ без введения CuBr при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 194 [пФ] (при давлении 90 торр)

Из осциллограмм на рисунках 1-13 определяем время задержки между током и напряжением при $0,1U_{\max}$ и по осциллограмме тока определяем $0,1I_{\max}$ и $0,9I_{\max}$ и соответствующие этим значениям, значения шкалы времени. Пример определения параметров приведен на рисунке 14.



а) – пример определения скорости нарастания тока; б) – пример определения времени задержки между током и напряжением

Рисунок 4.19 – пример определения параметров по осциллограмме тока необходимых для расчета скорости нарастания тока ($\Delta I/\Delta t$) и времени задержки

Из рисунка 4.19 (а), имеем:

$$\Delta I = 0.9I_{max} - 0.1I_{max} = 89.19 - 9.91 = 79.28 \text{ [A];}$$

$$\Delta t = t_{09} - t_{01} = 204.85 - 163.4 = 41.45 \text{ [нс].}$$

Скорость нарастания тока:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{79.28 \text{ A}}{41.45 \text{ нс}} = 1,913 \left[\frac{\text{A}}{\text{нс}} \right].$$

Из рисунка 4.19 б), время задержки между током и напряжением:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = 163,4 - 121.9 = 41.5 \text{ [нс].}$$

Остальной расчет времени задержки и скорости нарастания тока сведен в таблицы №4.6 – 4.9

Таблица №4.6 – Данные определенные из осциллограмм для обостряющего конденсатора 132 [пФ]

Соб = 132 пФ							
Р,торр	I,А	0,1I,А	0,9I,А	dI, А	dt, нс	dI/dt, А/нс	tз, нс
30	192	19,2	172,8	153,6	44	3,49091	16,5
45	143	14,3	128,7	114,4	52,4	2,18321	23
60	118	11,8	106,2	94,4	41,7	2,26379	25,7
75	101	10,1	90,9	80,8	40,5	1,99506	31,7
90	87,6	8,76	78,84	70,08	42,2	1,66066	38,2

Таблица №4.7 – Данные определенные из осциллограмм для обостряющего конденсатора 103 [пФ]

Соб = 103 пФ							
Р,торр	I,А	0,1I,А	0,9I,А	dI, А	dt, нс	dI/dt, А/нс	tз, нс
30	163	16,3	146,7	130,4	30,7	4,247557	20,3
45	146	14,6	131,4	116,8	34,45	3,390421	23,1
60	121	12,1	108,9	96,8	37	2,616216	25,5
75	103	10,3	92,7	82,4	47,85	1,722048	28,6
90	91,3	9,13	82,17	73,04	51,85	1,408679	29,5

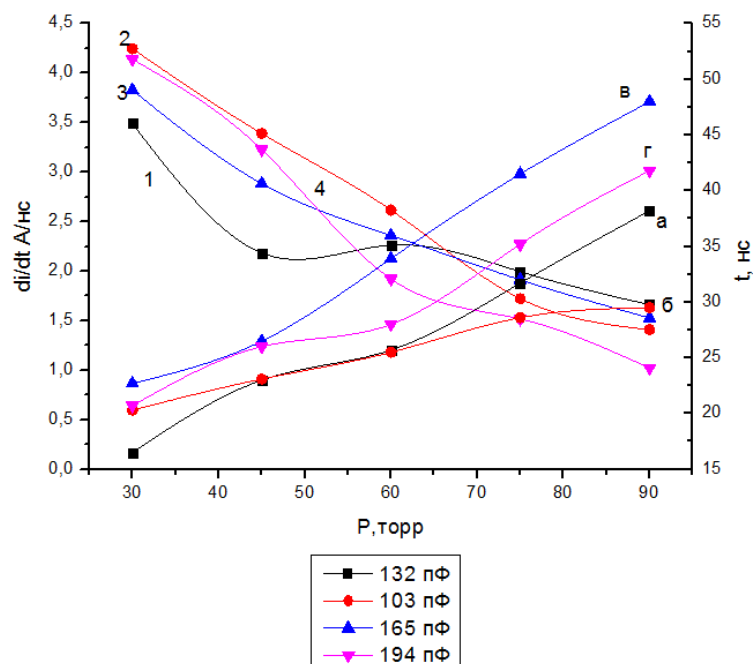
Таблица №4.8 – Данные определенные из осциллограмм для обостряющего конденсатора 165 [пФ]

Соб = 165 пФ							
Р,торр	I,А	0,1I,А	0,9I,А	dI, А	dt, нс	dI/dt, А/нс	tз, нс
30	167	16,7	150,3	133,6	34,9	3,8280802	22,7
45	144	14,4	129,6	115,2	39,95	2,8836045	26,5
60	119	11,9	107,1	95,2	40,35	2,3593556	33,9
75	99,1	9,91	89,19	79,28	41,45	1,9126659	41,5
90	80,3	8,03	72,27	64,24	42,1	1,5258907	48

Таблица №4.9 – Данные определенные из осциллограмм для обостряющего конденсатора 194 [пФ]

Соб = 194 пФ							
Р,торр	I,А	0,1I,А	0,9I,А	dI, А	dt, нс	dI/dt, А/нс	tз, нс
30	194	19,4	174,6	155,2	37,5	4,1386667	20,7
45	160	16	144	128	39,65	3,2282472	26
60	117	11,7	105,3	93,6	48,7	1,9219713	28
75	97,5	9,75	87,75	78	51,4	1,5175097	35,2
90	78,8	7,88	70,92	63,04	61,75	1,0208907	41,8

По данным из таблиц №4.6 – 4.9 строим графики, показанные на рисунке 4.19.



Кривые 1 и, а соответствуют обострительному конденсатору емкостью 132 [пФ]; Кривые 2 и, б соответствуют обострительному конденсатору емкостью 103 [пФ]; Кривые 3 и, в соответствуют обострительному конденсатору емкостью 165 [пФ]; Кривые 4 и, г соответствуют обострительному конденсатору емкостью 194 [пФ]

Рисунок 4.19 – зависимость скорости нарастания тока от давления и зависимость времени задержки между током и напряжением от давления

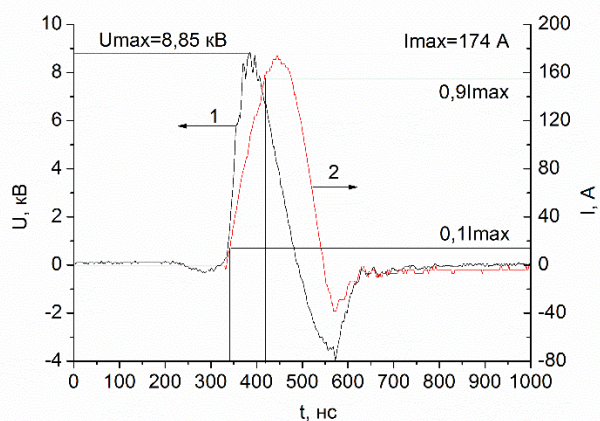
Рассматривая график на рисунке 4.19 можно сделать вывод, что максимальная задержка и максимальная скорость нарастания тока достигаются при использовании обострительного конденсатора емкостью 165 пФ. Поэтому он будет использоваться при экспериментах с введением в трубку паров активной среды (CuBr).

4.3 Эксперименты с введением в трубку паров CuBr

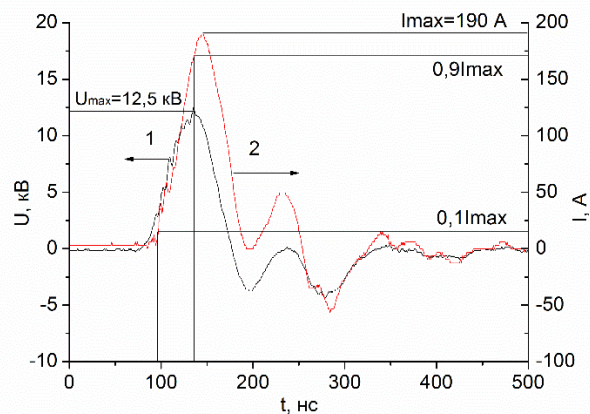
1) Схема без автотрансформатора
 $U_H = 8.5$ кВ; $I = 0.175$ А; $T_{CuBr} = 515$ °С.

Осциллограммы полученные экспериментально изображены на рисунках №4.20-4.24.

а)



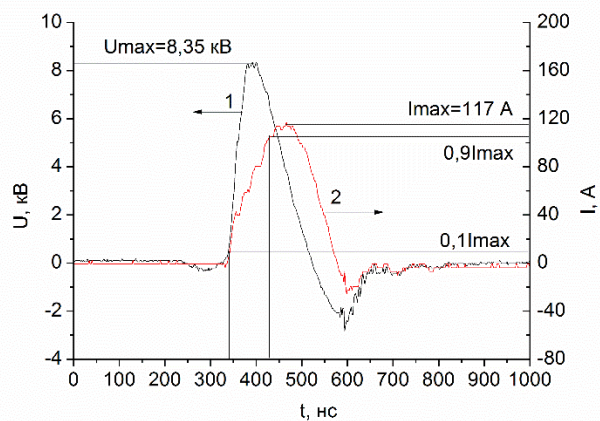
б)



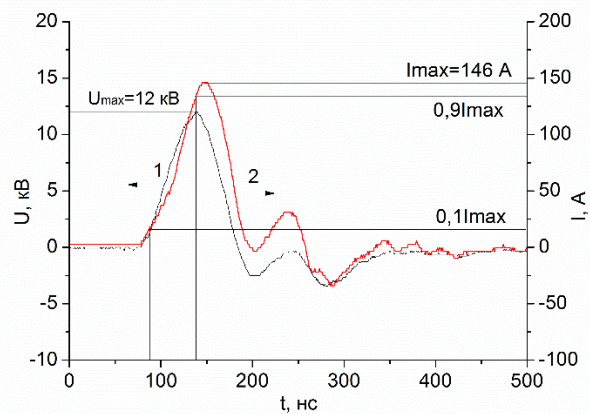
а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 [пФ]

Рисунок 4.20 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ при давлении 30 торр

а)



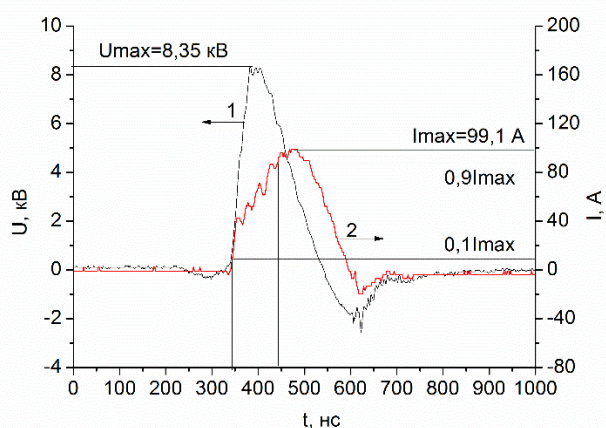
б)



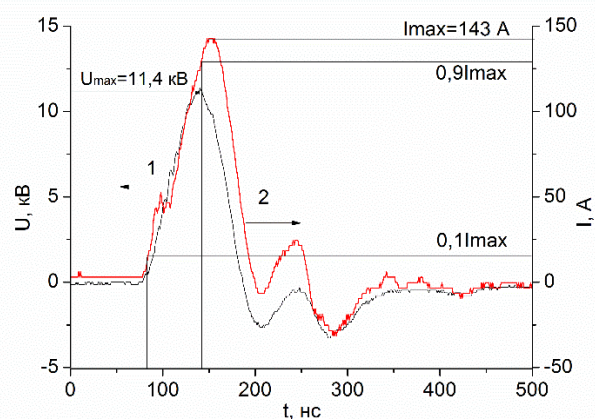
а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 [пФ]

Рисунок 4.21 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ при давлении 45 торр

а)



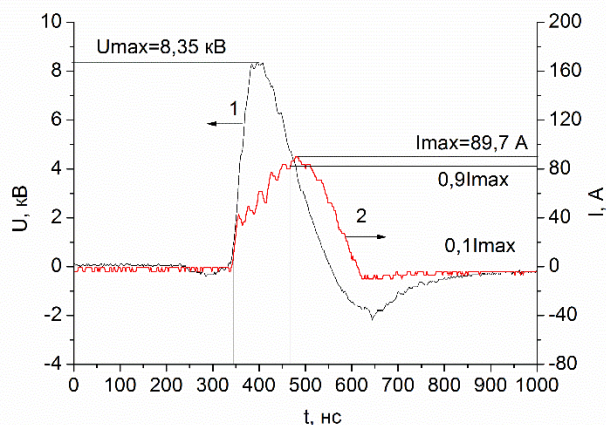
б)



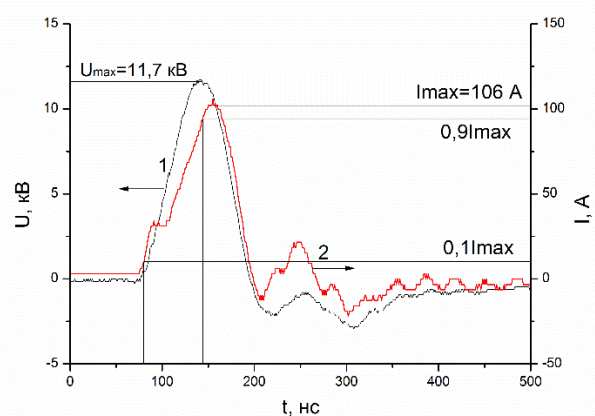
а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 [пФ]

Рисунок 4.22 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ при давлении 60 торр

а)

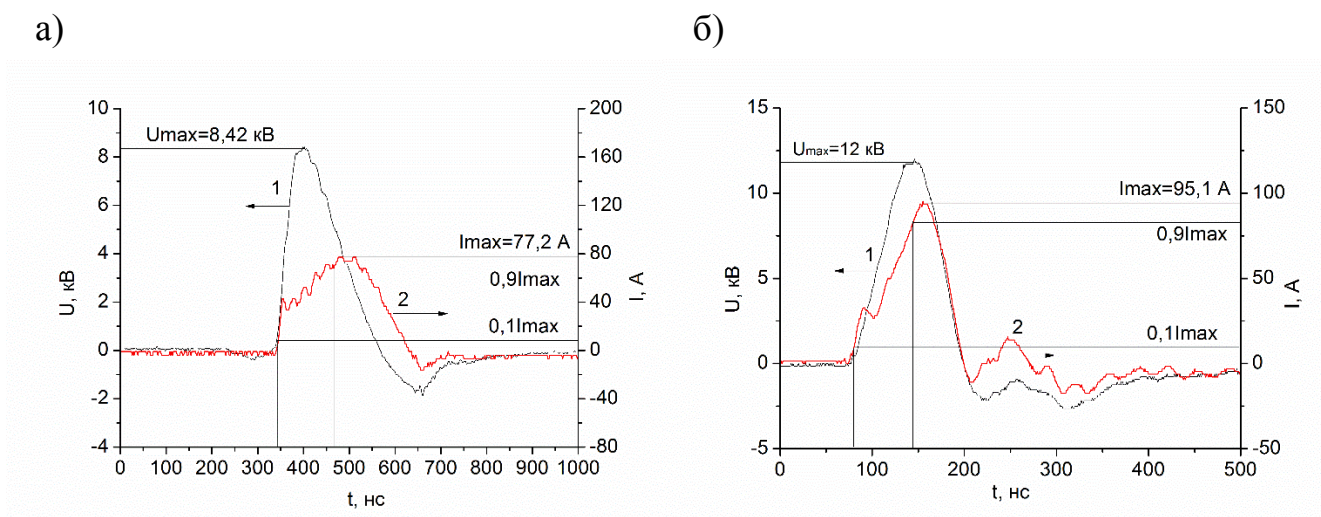


б)



а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 [пФ]

Рисунок 4.23 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на ГРТ при давлении 75 торр



а) – осциллограмма при схеме с прямой накачкой ГРТ; б) – осциллограмма при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 165 [пФ]

Рисунок 4.24 – Осциллограмма тока (2) и напряжения (1) на при давлении 90 торр

Расчет скорости нарастания тока для эксперимента с введенным в активную среду бромидом меди с обострительным конденсатором 165 пФ приведен в таблице 4.10.

Таблица №4.10 - Данные определенные из осциллограмм для обостряющего конденсатора 164 [пФ]

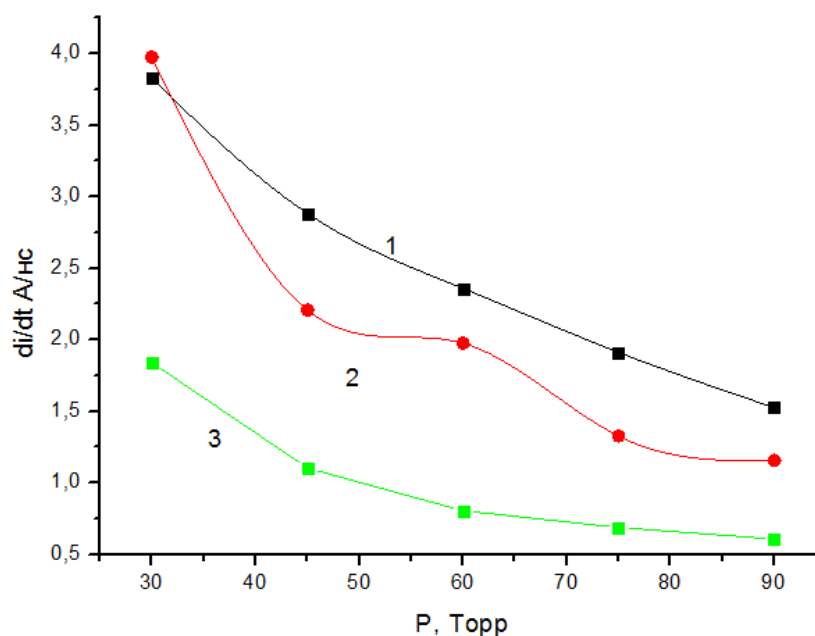
Соб = 165 пФ с введением CuBr						
Р,торр	I,А	0,1I,А	0,9I,А	dI, А	dt, нс	dI/dt, А/нс
30	174	17,4	156,6	139,2	35	3,9771429
45	146	14,6	131,4	116,8	52,9	2,2079395
60	143	14,3	128,7	114,4	57,9	1,9758204
75	106	10,6	95,4	84,8	63,9	1,3270736
90	95,1	9,51	85,59	76,08	65,8	1,156231

Расчет скорости нарастания тока для эксперимента с введением в трубку CuBr, с прямой накачкой ГРТ приведен в таблице 4.11.

Таблица №4.11 - Данные определенные из осциллограмм со схемой без автотрансформатора

прямая накачка						
Р, торр	I, А	0,1I, А	0,9I, А	dI, А	dt, нс	dI/dt, А/нс
30	174	17,4	156,6	139,2	75,6	1,8412698
45	117	11,7	105,3	93,6	84,85	1,1031232
60	99,1	9,91	89,19	79,28	98,5	0,8048731
75	89,7	8,97	80,73	71,76	104,2	0,6886756
90	77,2	7,72	69,48	61,76	101,9	0,6060844

Исходя из данных таблиц 4.8, 4.10 и 4.11 построим график зависимости скорости нарастания тока в ГРТ от давления (рисунок 4.25) с использованием конденсатора 165 [пФ] с введением в трубку CuBr и без.



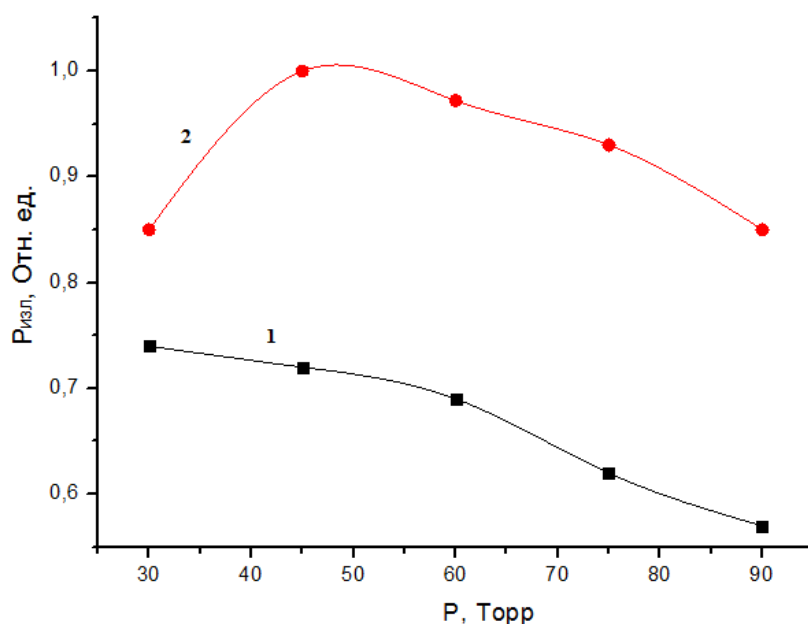
1- при обостряющем конденсаторе 165[пФ] без введения в трубку CuBr; 2 - при обостряющем конденсаторе 165 [пФ] с введением в трубку CuBr; 3 – при прямой накачке ГРТ с введением в трубку CuBr

Рисунок 4.25 – зависимость скорости нарастания тока от давления в ГРТ

Из графика на рисунке 4.25 видно, что при прямой накачке ГРТ скорость нарастания тока ниже чем при схеме накачки с автотрансформатором. Это говорит о том, что применение автотрансформатора с обостряющим конденсатором в схеме накачки лазера дает положительный результат, т. е.

использование автотрансформатора целесообразно.

Оценка мощности лазерного излучения в схеме с автотрансформатором и без него приведена на рисунке 4.26.



1 – схема без автотрансформатора; 2 – схема с автотрансформатором и обострительным конденсатором 165 [пФ]

Рисунок 4.26 – зависимость мощности излучения лазера от давления

Коэффициент полезного действия лазера на прах металлов варьируется от 1 до 3 %. Этот показатель является достаточно хорошим. При использовании автотрансформатора в схеме накачки лазера наблюдается увеличение мощности излучения на 20-30 %. Это ведет к увеличению КПД лазерной установки.

Оценка энерговклада в ГРТ.

Пример расчета энерговклада приведен на рисунке 4.27, 4.28.

По полученным ранее осциллограммам тока и напряжения рассчитываем мощность в импульсе (рисунок 4.27). Интегрируя эту мощность получим энергию, вкладываемую в трубу (рисунок 4.28).

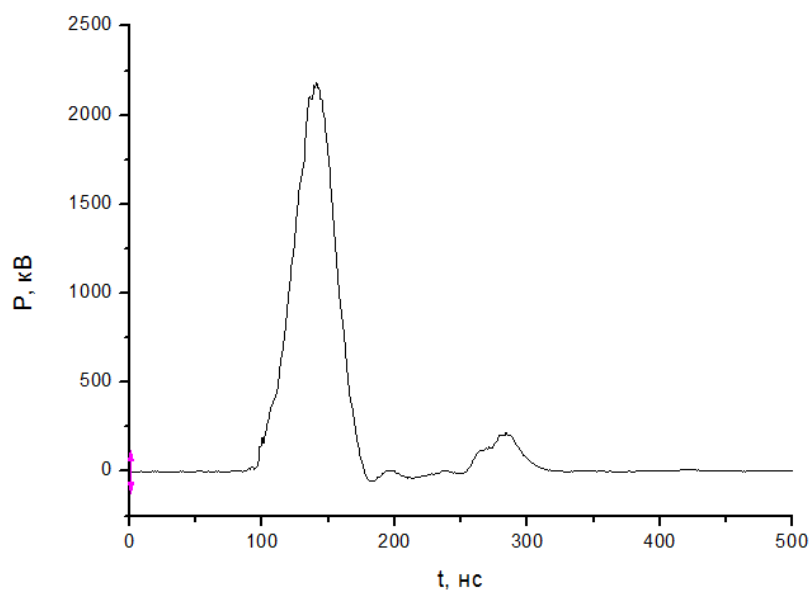
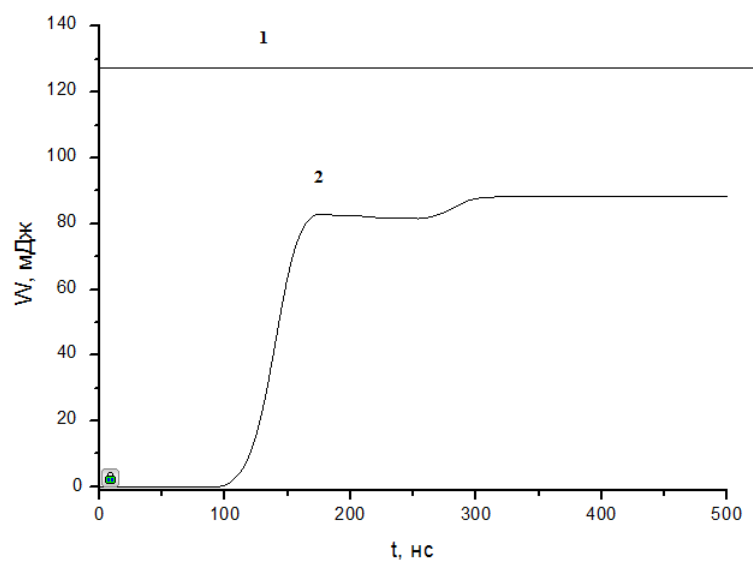


Рисунок 4.27 – мощность в импульсе возбуждения при 165 [пФ]

Оценка энергии, запасенной в конденсаторе

$$W_{\text{зап}} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{1.65 \cdot 10^{-9} \cdot 12.5^2 \cdot 10^6}{2} = 128.9 \text{ [мДж]}.$$



1 – энергия, запасенная в конденсаторе; 2 – энергия, вложенная в ГРТ.

Рисунок 4.28 – энергия в ГРТ

Для случая со схемой с автотрансформатором и обострительным конденсатором 165 пФ при давлении 30 торр, энергия, вложенная в ГРТ составила 88,45 мДж.

Для остальных случаев расчет энергии, запасенной в конденсаторе и энергии вложенной в ГРТ свожу в таблицу 4.12.

Таблица 4.12 – энергия, вкладываемая в ГРТ

Р,торр	прямая накачка с CuBr		Соб = 165 пФ с CuBr	
	Wзап, мДж	Wвл, мДж	Wзап, мДж	Wвл, мДж
30	119	91,42	128,9	88,45
45	119	75	118,8	75,4
60	119	66,1	107,2	73,2
75	119	63	112,9	60
90	119	59	118,8	57

На основании полученных данных можно сделать вывод, что при увеличении давления снижается энерговклад в ГРТ, так как ток протекающий в ГРТ снижается. Энергии вложенная в трубку при схеме с прямой накачкой и при схеме с автотрансформатором имеют незначительное отличие, но схема с автотрансформатором имеет преимущество так как скорость нарастания тока выше. Следовательно, вероятность заселения резонансных уровней выше.

4.4 Влияние давления в ГРТ на мощность генерации

Данные по экспериментальной части занесены в таблицу 4.13.

Условия эксперимента: $U_H = 9.5$ кВ; $I = 0.18$ А; $T_{CuBr} = 503$ °С, $f = 9$ кГц.

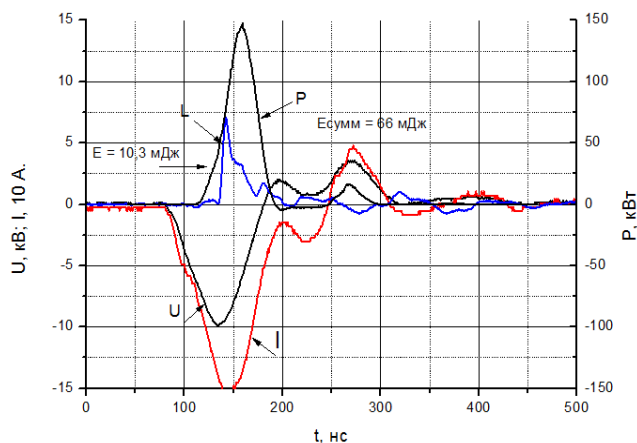
$$C_{об} = \frac{165 \cdot 470}{635} = 122 \text{ [пФ]};$$

Таблица 4.13 – Повышение давления в ГРТ при схеме с автотрансформатором и обострительным конденсатором емкостью 122 [пФ]

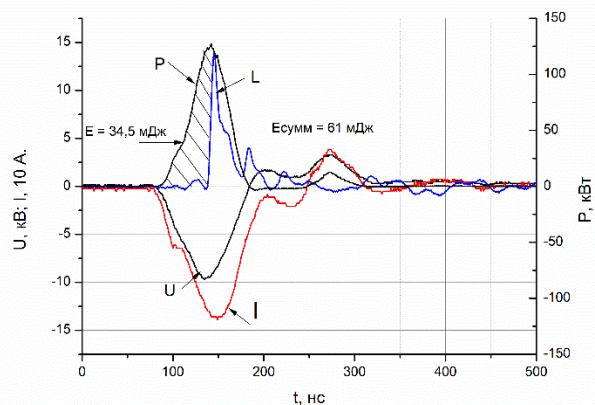
Р,Торр	30	45	60	75	90
I, А	0,18	0,16	0,145	0,142	0,135
№ изм-я	34	35	36	37	38
№ осц.	76	77	78	79	80
Р _{изл} , Вт	0,8	1	1,12	1,05	1

Импульс генерации при различных давлениях приведен на рисунках 4.29-4.31.

а)



б)

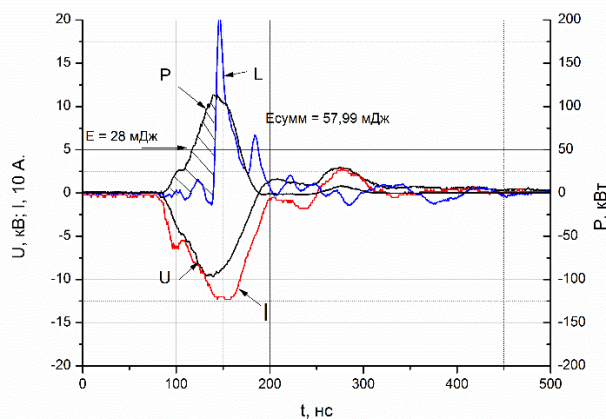


U – Напряжение на ГРТ; I – ток на ГРТ; P – мгновенная мощность
вкладываемая в ГРТ; L – мощность генерации

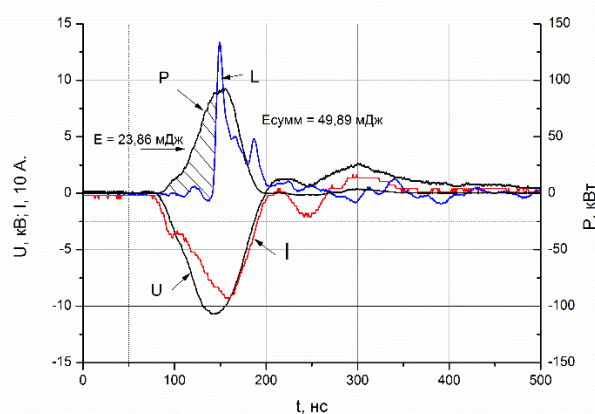
а) импульс генерации при давлении 30 торр; б) импульс генерации при
давлении 45 торр

Рисунок 4.29 – импульс генерации

а)



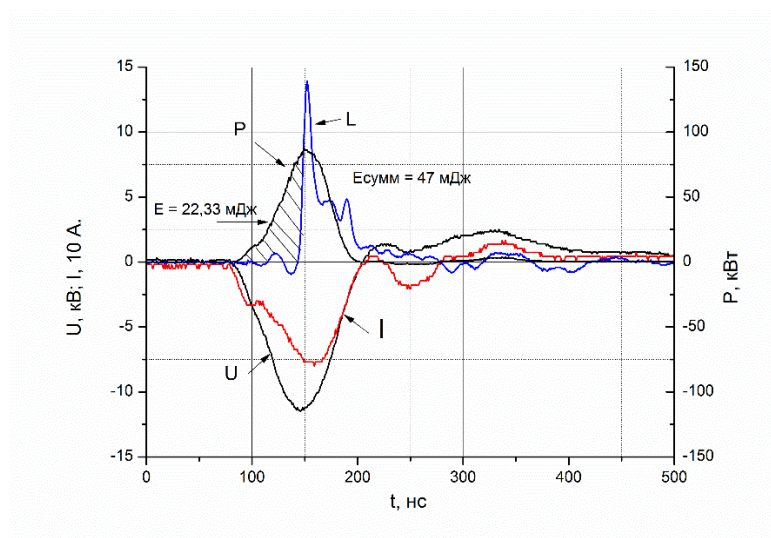
б)



U – Напряжение на ГРТ; I – ток на ГРТ; P – мгновенная мощность
вкладываемая в ГРТ; L – мощность генерации

а) импульс генерации при давлении 60 торр; б) импульс генерации при
давлении 75 торр

Рисунок 4.30 – импульс генерации



U – Напряжение на ГРТ; I – ток на ГРТ; P – мгновенная мощность
вкладываемая в ГРТ; L – мощность генерации

Рисунок 4.31 – импульс генерации при давлении 90 торр

Параметры, рассчитанные по осциллограммам на рисунках 4.29-4.31
сведем в таблицу 4.14.

Таблица 4.14 – Энергия, за импульс возбуждения

Р,Торр	30	45	60	75	90
Есумм, мДж	66	61	57,99	49,89	47
Е, мДж	10,3	34,5	28	23,86	22,3

Из рисунков 4.29-4.31 видно, что использование автотрансформатора
дает увеличение напряжения с 8,5 кВ до 14 кВ, и изменению энерговклада в
среду. При давлении 30 торр энерговклад за импульс возбуждения составил 66
мДж, до начала импульса генерации энергия, поступающая в среду, составила
около 15% от энерговклада за импульс, т. е 10,3 мДж, средняя мощность
излучения при этом составила 0,8 Вт. При повышении давления до 45 торр
наблюдается рост энергетических характеристик, энерговклад за импульс
слегка снизился по сравнению с экспериментом при давлении 30 торр, но при
этом увеличилась энергия, поступающая в среду до начала генерации, которая
составила 34,5 мДж, и средняя мощность возросла до 1 Вт. При давлении 60
торр, энергровклад за импульс составил 57,99 мДж, энергия до начала генерации

28 мДж. Несмотря на снижение энерговклада средняя мощность возросла до 1,12 Вт. При давлениях 75 и 90 торр наблюдается незначительное снижение средней мощности до 1,05 и 1 Вт соответственно. При давлении 75 торр, энергровклад за импульс составил 49,89 мДж, энергия до начала генерации 23,86 мДж. При давлении 90 торр, энергровклад за импульс составил 47 мДж, энергия до начала генерации 22,33 мДж. Эффективность возбуждения при давлении 60 торр, определяемая как отношение энергии излучения к общему энерго вкладу, увеличилась с 0,13% (схема с прямой накачкой) до 0,2% (Схема с автотрансформатором), т.е. произошло увеличение КПД на 35%. При давлениях 30, 45, 75 и 90 торр увеличение КПД составило 15,38%, 22,2%, 46% и 45,8%. Таким образом мы видим, использование автотрансформатора в схеме накачки лазеров на парах бромида меди является эффективным.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Рахимжанов Асхат Темирбулатович

Школа	ИШНПТ	Отделение	ОМ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	13.04.02. Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ):	<i>Затраты на выполнение НИР включают в себя затраты на сырье, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ, основную и дополнительную заработную платы исполнителей, отчисления на социальные нужды, накладные расходы</i>
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	<i>Нормы амортизации установки 10% Нормы амортизации ПК 33,3%</i>
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	<i>НИР выполнялась в соответствии со стандартной системой налогообложения, отчислений, кредитования</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Предпроектный анализ	<i>Определение потенциальных потребителей результатов исследования и анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, оценка готовности проекта к коммерциализации</i>
2. Инициация проекта	<i>Информация о заинтересованных сторонах проекта, цели и ожидаемые результаты НИР, трудозатраты и функции исполнителей проекта</i>
3. Планирование управления научно-техническим проектом	<i>Составление перечня этапов и работ по выполнению НИР, составление калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов</i>
4. Оценка сравнительной эффективности исследования	<i>Расчёт интегрального показателя эффективности НИР, за счёт определения его основных составляющих: финансовой эффективности и ресурсоэффективности</i>
Перечень Графического материала:	<ul style="list-style-type: none"> – Карта сегментирования рынка – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

	<ul style="list-style-type: none"> – График проведения и бюджет НТИ – Календарный план проекта – Длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе (диаграмма Ганта) – Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук ШБИП	Старикова Екатерина Васильевна	Кандидат философских наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рахимжанов Асхат Темирбулатович		

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Целью данной диссертационной работы является разработка источника питания для газового лазера с кабельным импульсным трансформатором. Данный источник питания значительно снизит габариты установки лазера за счет увеличения напряжения на газоразрядной трубке. Снижение габаритов и массы повлечет за собой снижение цены на материалы, из которых собран источник. Благодаря вышесказанному данный источник питания лазера будет конкурентоспособен на рынке.

5.1 Предпроектный анализ

Потенциальные потребители результатов исследования

В результате анализа потенциальных потребителей результатов разработок рассмотрен целевой рынок и проведено его сегментирование.

Определены основные критерии сегментирования.

Источник питания лазера с кабельным импульсным трансформатором имеет выходное напряжение, значительно превышающее напряжение, требуемое для работы оборудования общего пользования, что говорит о невозможности его использования в частных домашних целях. Напряжение такого высокого уровня используется для работы промышленных установок. Таким образом, целевым рынком для разработанного источника заряда конденсатора, в основном, являются научно-исследовательские организации и промышленные предприятия.

Исходя из данных, представленных на карте сегментирования рынка производства и использования источников питания лазерных установок, можно сделать вывод, что основные потребители относятся к промышленной отрасли.

Несмотря на эти данные, для реализации и внедрения устройства имеется большой потенциал, так как данное устройство имеет высокую надёжность, высокий КПД, хорошее качество выходного напряжения за счёт использования повышающего трансформатора.

Таблица 5.1 – Карта сегментирования рынка

	Для чего используется		
	Накачка лазера	Исследования параметров атмосферы	Лазерная обработка материалов
Научно – исследовательские центры			
Промышленные предприятия			
Физические лица			



Сегмент освоен слабо
Сегмент освоен
Сегмент не освоен или информация не найдена

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Поскольку рынок пребывает в постоянном движении, необходимо систематически производить детальный анализ конкурирующих разработок.

Проведение анализа помогает вносить коррективы в научное исследование для успешного противостояния конкурентным разработкам. Для проведения данного анализа необходимо обладать всей имеющейся информацией о разработках конкурентов, такой как: технические характеристики разработки, конкурентоспособность разработки, уровень завершенности научного исследования, уровень проникновения на рынок и т.д.

Проводить анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения удобно с помощью оценочной карты (таблица 5.2). Это необходимо для оценки сравнительной эффективности научной разработки и определения направления ее будущего повышения.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 5.2, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Наиболее конкурентными разработками для источника питания лазера для возбуждения лазера на парах металлов являются, высоковольтные трансформаторные преобразователи.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot b_i, \quad (5.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

b_i – балл i -го показателя.

Таблица 5.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений(разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,04	5	3	4	0,2	0,12	0,16
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,07	4	4	3	0,28	0,28	0,21
3. Помехоустойчивость	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
4. Энергоэкономичность	0,09	4	3	3	0,36	0,27	0,27
5. Надежность	0,09	5	2	3	0,45	0,18	0,27
6. Уровень шума	0,04	5	5	4	0,2	0,2	0,16
7. Безопасность	0,08	5	3	3	0,4	0,24	0,24
8. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	4	3	3	0,16	0,12	0,12
9. Простота эксплуатации	0,07	5	4	3	0,35	0,28	0,21
10. Качество интеллектуального интерфейса	0,02	4	4	3	0,08	0,08	0,06
11.Массогабаритные параметры устройства	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,04	4	3	2	0,16	0,12	0,08
2. Уровень проникновения на рынок	0,03	2	3	2	0,06	0,09	0,06
3. Цена	0,04	4	4	3	0,16	0,16	0,12
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	5	5	4	0,35	0,35	0,28
5. Послепродажное обслуживание	0,07	5	4	4	0,35	0,28	0,28
6. Срок выхода на рынок	0,02	1	3	3	0,02	0,06	0,06
7. Наличие сертификации разработки	0,09	2	5	5	0,18	0,45	0,45
Итого	1	71	65	59	4,14	3,66	3,41

Исходя из результатов анализа, можно сделать вывод, что источник питания с кабельным импульсным трансформатором на данном этапе

достаточно конкурентоспособен. Проект является перспективным, поскольку главными его преимуществами являются высокая надёжность его работы, низкий уровень создаваемых шумов, высокий КПД накачки.

Оценка готовности проекта к коммерциализации

При разработке оборудования полезно оценивать степень его готовности к коммерциализации и выявить возможность ее самостоятельного проведения или завершения. Для проведения оценки необходимо заполнить специальную форму оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации. В таблице 5.3 представлен перечень вопросов, по которым необходимо произвести оценку.

Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации определяется по формуле:

$$B_{\text{сумм}} = \sum B_i. \quad (5.2)$$

где $B_{\text{сумм}}$ – суммарное количество баллов по каждому направлению;

B_i – балл по i -му показателю.

Таблица 5.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.Определены перспективные направления коммерциализации	4	3
3.Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	2	2
4.Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	1	2
5.Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	4
6.Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	1	1

Продолжение таблицы 5.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
7.Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	1
8.Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	1	1
9.Определены пути продвижения научной разработки на рынок	1	1
10.Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	1	1
11.Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	1
12.Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	1
13.Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	1	1
14.Имеется команда для коммерциализации научной разработки	1	1
15.Проработан механизм реализации научного проекта	1	1
ИТОГО БАЛЛОВ	27	26

На основе данных, представленных в таблице 5.3, можно говорить о том, что проект не готов к коммерциализации, так как имеет ряд недоработок, устраняемых научной группой.

5.2 Инициация проекта

Цели и результаты проекта

В таблице 5.4 представлена информация о заинтересованных сторонах проекта.

Таблица 5.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Руководитель проекта	Использование результатов проекта в дальнейших исследованиях
Исполнитель по проекту	Повышения уровня квалификации благодаря работе в научной сфере.
Организация заказчик	Использование результатов интеллектуальной деятельности для повышения конкурентоспособности организации
Спонсор проекта	Развитие российских научных исследований и программ. Повышение уровня качества научных исследований в стране.

В таблице 5.5 представлена иерархия целей проекта и критерии достижения целей.

Таблица 5.5 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Разработка, создание и исследование источника питания лазера с кабельным импульсным трансформатором для увеличения КПД накачки.
Ожидаемые результаты проекта:	Действующий макет источника питания лазера
Критерии приемки результата проекта:	Работоспособное устройство, технические характеристики которого соответствуют требованиям технического задания
Требования к результату проекта:	Требование:
	Выходное напряжение до 25 кВ
	Мощность до 100 кВт
	Плавность регулировки выходного напряжения
	Стабильность выходного напряжения

Организационная структура проекта

В таблице 5.6 приведена информация о рабочей группе проекта, ролях, функциях и трудозатратах каждого.

Таблица 5.6 – Рабочая группа проекта

Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, день
1. Научный руководитель	Постановка задачи и целей проекта, консультирование исполнителей проекта в области электроники, проведение экспериментов с макетом разработки, участие в обсуждениях по результатам работы	20
2. Инженер	Обзор литературы о схемотехнических решениях, оценка их недостатков и преимуществ, исследование моделей схем заряда, разработка и сборка макета устройства, проведение экспериментов на макете, участие в обсуждениях по результатам работы	75
ИТОГО:		95

Ограничения и допущения проекта

Данные об ограничениях и допущениях проекта представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/допущения
1. Бюджет проекта	40000 р.
1.1. Источник финансирования	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева. Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)
2. Сроки проекта	01.03.2017-12.06.2018
2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2018
2.2. Дата завершения проекта	12.06.2018
3. Прочие ограничения и допущения	Ограниченное время работы за ПК, связанное с вредным влиянием ЭМ излучения, ограниченное время работы при монтаже макета, связанное с недостатком компонентной базы

5.3 Планирование управления научно-техническим проектом

План проекта

Планирование управления научно-техническим проектом заключается в

составлении перечня работ, необходимых для достижения поставленной цели, определение сроков их выполнения.

Планирование этапов работ по выполнению НИР включает в себя составление перечня этапов и работ, а также распределение исполнителей по всем видам работ. В таблице 6.8 приведены основные этапы и содержание работ с распределением ответственных исполнителей.

Целесообразно применять линейное планирование с построением диаграммы Ганта, представленной в таблице 5.9. График строится с разбивкой по месяцам (30 дней) за период времени выполнения научного проекта.

Таблица 5.8 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Вид работы	Исполнители	Период работы научного руководителя		Период работы инженера	
			Начало, дата	Длительность, дни	Начало, дата	Длительность, дни
1	Постановка задачи	НР	09.01.2018	1	-	-
2	Анализ технического задания (ТЗ)	НР, И	27.02.2018	1	27.02.2018	3
3	Подбор и изучение литературы по теме исследования	И	-	-	05.03.2018	10
4	Разработка методики исследований	И	-	-	15.03.2018	3
5	Проектирование и расчет схемы	И	-	-	18.03.2018	8
6	Исследование схемы источника питания в программе LTSpice	И	-	-	25.03.2018	3
7	Сборка ИКТ для источника питания	НР, И	10.04.2018	3	28.03.2018	12
8	Проведение экспериментов и исследование модуля, его доработка	НР, И	13.04.2018	1	13.04.2018	1
9	Дальнейшая сборка прибора и его испытание	НР, И	14.05.2018	10	14.04.2018	41
10	Оформление расчетно-пояснительной записки	И	-	-	25.05.2018	10
11	Сдача разработки и отчета о работе	НР, И	04.06.2018	11	04.06.2018	11

В таблице 5.9, которая представляет собой диаграмму Ганта, приведена длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

Таблица 5.9 – Длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе

Этап	НР	И	Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
			1	2		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
Постановка задачи	1	-				3										
Анализ технического задания (ТЗ)	1	3														
Подбор и изучение литературы по теме исследования	-	10														
Разработка методики исследований	-	3														
Проектирование и расчет схемы	-	8														
Исследование схемы источника питания в программе LTSpice	-	3														
Сборка импульсного кабельного трансформатора для источника питания	3	12														
Проведение экспериментов и исследование модуля, его доработка	1	1														
Дальнейшая сборка прибора и его испытание	10	41														
Оформление расчетно-пояснительной записки	-	10														
Сдача разработки и отчета о работе	11	11														

■ - НР (Научный руководитель); ■ - И (Инженер)

Бюджет научного исследования

Планирование бюджета научного исследования производится путем составления калькуляции по отдельным статьям затрат всех видов необходимых ресурсов.

Сырье, материалы, специальное оборудование, покупные изделия

Стоимость всех видов и материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ формируется исходя из стоимости приобретения и платы за транспортировку. Транспортно – заготовительные расходы принимаются в пределах от 3 до 5 % от цены материалов (в данной работе 3%). В том случае, если расходы, связанные с доставкой материальных ресурсов незначительны, то их можно опустить.

Стоимость сырья, материалов, специального оборудования, комплектующих изделий приведена в таблице 5.10

Таблица 5.10 – Сырье, материалы, комплектующие изделия

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Принтер	1	2000	2000
Электронные компоненты	1	8000	8000
Расходные материалы	1	1000	1000
Печатная бумага	1	250	250
Канцелярские товары	1	100	100
Осциллограф	1	25000	25000
Источник питания	1	1000	1000
Мультиметр	2	1000	2000
Персональный компьютер	1	20000	20000
Паяльная станция	1	1500	1500
Всего за материалы			60850
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)			1825,5
Итого по статье С_м			62675,5

Основная заработная плата

В статью включается основная заработная плата работников, непосредственно участвующих в выполнении работ. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, включая премии, доплаты и дополнительную заработную плату.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}, \quad (5.3)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (5.4)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дней.

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (5.5)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; Баланс рабочего времени в таблице 5.11.

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot K_{\text{р}}, \quad (5.6)$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска). Расчет основной заработной платы приведен в таблице 5.12.

Таблица 5.11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Инженер
Календарное число дней	110	110
Количество нерабочих дней:		
- выходные дни	20	32
- праздничные дни	3	3
Потери рабочего времени		
- отпуск	108	56
- невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	87	75

Таблица 5.12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	З _б , руб	к _р	З _м , руб.	З _{дн} , руб.	Т _р , раб.дн.	З _{осн} , руб.
Научный руководитель	25400	1,3	33020	3947,22	20	78944,37
Инженер	7500	1,3	9750	1352	75	101400

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде. Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта:

$$З_{\text{доп}} = K_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}, \quad (5.7)$$

где $K_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты;

$З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 5.13 приведен расчет основной и дополнительной зар. платы.

Таблица 5.13 – Заработная плата исполнителей НИР

Заработная плата	Научный руководитель	Инженер
Основная зарплата	78944,37	101400,0
Дополнительная зарплат	7894,44	10140,00
Зарплата исполнителей	86838,81	111540,0
Итого по статье С _{зп}	198378,81	

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (5.8)$$

где $K_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Итого 30% от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением НИР:

$$C_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot 198378,81 = 59513,64 \text{ руб.}$$

Накладные расходы

В данную статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, содержание, эксплуатацию, ремонт оборудования, производственного инструмента и инвентаря.

Коэффициент накладных расходов составляют 80-100% от суммы основной и дополнительной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении проекта.

Накладные расходы рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (5.9)$$

где $K_{\text{НАКЛ}}$ – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,8 \cdot 198378,81 = 158703,05 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости научно-исследовательской работы (таблица 5.14).

Таблица 5.14 – Калькуляция плановой себестоимости НИР

Наименование статей затрат	Сумма, руб
Сырье, материалы, комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	62675,50
Основная заработная плата	180344,37
Дополнительная заработная плата	18034,44
Отчисления на социальные нужды	59513,64
Накладные расходы	158703,05
Итого себестоимость НИР	479271,00

5.4 Оценка сравнительной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (5.10)$$

где I_{Φ}^p – интегральный финансовый показатель разработки,

Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в том числе налоги).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p, \quad (5.11)$$

где I_m – интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов,

a_i – весовой коэффициент i-го параметра;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i-го параметра для аналога и разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведен в форме таблицы 5.15

Из таблицы 5.15 видно, что интегральный показатель ресурсоэффективности текущего проекта больше, чем у предлагаемых аналогов. Таким образом, источник питания лазера с кабельным импульсным трансформатором является более ресурсоэффективной разработкой, относительно аналогов.

Таблица 5.15– Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерий	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2	I _{тп}	I _{ан1}	I _{ан2}
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	3	4	0,75	0,45	0,6
3. Помехоустойчивость	0,2	4	3	3	0,8	0,6	0,6
4. Энергосбережение	0,15	4	4	5	0,6	0,6	0,75
5. Надежность	0,3	5	4	3	1,5	1,2	0,9
6. Материалоемкость	0,1	2	4	5	0,2	0,4	0,5
ИТОГО	1	24	21	23	4,25	3,55	3,65

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4ТМ61	Рахимжанов Асхат Темирбулатович

Школа	ИШНПТ	Отделение	М
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования – источник питания лазерной установки;</p> <p>Рабочая зона – исследовательская лаборатория института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук</p> <p>Область применения – металлообрабатывающая промышленность, исследования атмосферы.</p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико—химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>1. Вредные факторы производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> -повышенный уровень ионизирующих и ультрафиолетового излучений в рабочей зоне; При прохождении тока через активное вещество в газоразрядной трубке происходит ионизация вещества и последующее ультрафиолетовое излучение. <p>Допустимый уровень ионизирующих излучений согласно СП 2.6.1.758-99 Нормы радиационной безопасности составляет 150 мЗв в год. Уровень в лаборатории составляет 210 мЗв в год.</p> <p>Средства защиты: затемненные очки для глаз.</p> <ul style="list-style-type: none"> -электромагнитное поле от генераторов накачки. Энергетическая экспозиция в диапазоне частот 3 – 30 МГц: $E_{\text{ЭЭ}} = 5000 \text{ (В/м}^2\text{)} \cdot \text{ч}$, по ПДУ $E_{\text{ЭЭ}} = 7000 \text{ (В/м}^2\text{)} \cdot \text{ч}$. $E_{\text{ЭН}} = 270 \text{ (В/м}^2\text{)} \cdot \text{ч}$, по ПДУ $E_{\text{ЭЭ}} = 200 \text{ (А/м}^2\text{)} \cdot \text{ч}$. СанПиН 2.2.4.1191-03 <p>Электромагнитные поля в производственных условиях.</p> <p>Средства защиты: Применение металлических экранов, установка помещается в стальной корпус.</p> <p>2. Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Повышенное значение напряжения до 30 кВ, электрический ток до 250 А.
--	---

	<p>Источниками опасных факторов являются токоведущие часть электроустановки. Средства защиты: выравнивание потенциалов, электрическое разделение сети, зануление, система защитных проводов, защитное заземление, защитное отключение, средства индивидуальной защиты;</p> <p>-повышенный уровень статического электричества от генераторов накачки.</p>
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <p>-защита селитебной зоны</p> <p>-анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</p> <p>-анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</p> <p>- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</p> <p>- разработать решения по обеспечению экологической безопасности.</p>	<p>Лазерная установка находится на территории исследовательской лаборатории института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук. При прохождении электрического тока через активную среду лазера образуется озон. Озон – короткоживущий радикал. В лаборатории обеспечивается воздухообмен в рабочем помещении согласно СанПиН 2.6.1.3288-15.</p> <p>Лазерная установка не оказывает никакого влияния на гидросферу и литосферу не оказывает, т.к. отсутствуют сбросы в гидросферу и литосферу. При работе лазера не происходит загрязнение тяжелыми металлами, вредными химическими веществами и воздействие вибрации.</p> <p>Экологическая безопасность отражена в документе СанПиН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.</p>
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <p>3.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.</p> <p>3.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут при проведении исследований.</p> <p>3.3. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.</p>	<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <p>Перечень возможных ЧС: возгорание оборудования при нарушении герметичности газоразрядной трубки лазера; при перегреве токоведущих частей источника накачки лазера; при коротком замыкании в источнике питания.</p> <p>В качестве наиболее типичной ситуации рассматривается пожар. Превентивные меры по предупреждению возгораний: Проводятся инструктажи по технике безопасности: первичный, вводный и повторный (два раза в год), так же необходимо следить за состоянием электрической проводки, не оставлять без присмотра включенные электронагревательные приборы (паяльник).</p> <p>При возгорании в срочном порядке необходимо сообщить о пожаре по телефону 01, дать сигнал тревоги, принять меры по эвакуации людей. В срочном порядке покинуть помещение. При</p>

	возможности приступить к устранению пожара с помощью имеющихся средств пожаротушения.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <p>Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны: технический перерыв, проветривание, полная изоляция от производственных источников шума и вибрации</p> <ul style="list-style-type: none"> • Нормативно-правовая документация САНИТАРНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАЗЕРОВ СанПиН 5804-91 • Государственный стандарт РФ ГОСТ Р 50723-94 "Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий"
Перечень Графического материала:	<ul style="list-style-type: none"> – пути эвакуации; – план размещения светильников на потолке рабочего помещения.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук ШБИП	Ахмеджанов Рафик Равильевич	Доктор биологических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рахимжанов Асхат Темирбулатович		

Глава 6. Социальная ответственность

Введение

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

В данной работе рассмотрена лазерная установка в качестве активного элемента которой используется пары бромиды меди, которая является лабораторной установкой.

Под проектированием рабочего места понимается целесообразное пространственное размещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях функционально взаимосвязанных средств производства (оборудования, оснастки, предметов труда и др.), необходимых для осуществления трудового процесса.

При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест.

При проектировании лаборатории необходимо уделить внимание и охране окружающей среды, а в частности, организации безотходного производства.

Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций. Так как лаборатория находится в городе Томске, наиболее типичной ЧС является мороз.

6.1. Производственная безопасность

6.1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования

В лаборатории, где находятся различные лазерные электроустановки, а также используются химические соединения бромиды меди в качестве активной

среды лазера, могут быть следующие вредные факторы, которые создает сам объект исследования: наличие, а) вредных веществ; б) производственного шума; в) теплового излучения.

Вредные вещества

Процесс сборки источника питания лазерной установки на основе бромида меди, связан с различными по классу опасности пунктами. В целях обеспечения безопасных условий труда персонала установлены предельно допустимые уровни лазерного излучения, т.е. уровни лазерного излучения, которые при ежедневном воздействии на человека не вызывают в процессе работы или в отдаленные сроки отклонений в состоянии здоровья.

Класс опасности вредных веществ устанавливают в зависимости от норм и показателей, указанных в таблице 6.1.

По степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделены на четыре класса опасности: 1 - вещества чрезвычайно опасные, 2 - вещества высоко опасные, 3 - вещества умеренно опасные, 4 - вещества мало опасные, в соответствии с классификацией ГОСТ 12.1.007-76. «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».

При работе с лазерной установкой в результате радиолиза воздуха под действием ионизирующего излучения образуются озон и окислы азота. Предельная допустимая среднесуточная концентрация (ПДКсс) для оксида азота – 0,06 мг/м³, для озона – 0,03 мг/м³. Исходя из таблицы 6.1 данные вещества относят к 1 классу опасности.

Таблица 6.1. – Предельно допустимые концентрации при работе с лазерным излучением

Наименование показателей	Норма для класса опасности			
	1-го	2-го	3-го	4-го
Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Менее 0,1	0,1-1,0	1,1-10,0	Более 10,0
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	15-150	151-5000	Более 5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 100	100-500	501-2500	Более 2500

Продолжение таблицы 6.1

Наименование показателей	Норма для класса опасности			
	1-го	2-го	3-го	4-го
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	Менее 500	500-5000	5001-50000	Более 50000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	Более 300	300-30	29-3	Менее 3
Зона острого действия	Менее 6,0	6,0-18,0	18,1-54,0	Более 54,0
Зона хронического действия	Более 10,0	10,0-5,0	4,9-2,5	Менее 2,5

В соответствии с ГОСТ 12.1.040-83 ССБТ. Лазерная безопасность. Общие положения. При работе с лазерной установкой опасными и вредными производственными факторами являются: лазерное излучение (прямое, рассеянное или отраженное), ультрафиолетовое излучение, электромагнитное излучение, ионизирующее излучение, повышенное значение напряжения в электрических цепях, повышенная температура, например, внутренних элементов лазерного изделия, а также возможность взрыво- и пожароопасности, повышенная температура воздуха рабочей зоны, повышенный уровень статического электричества, повышенная яркость света, повышенные шум и вибрация.

В соответствии с ГОСТом 12.4.120-83. «Средства коллективной защиты от ионизирующих излучений».

СКЗ:

- оградительные;
- герметизирующие;
- теплоизолирующие;
- вентиляционные;
- автоматического контроля и сигнализации;
- устройства защитного заземления и зануления;
- устройства автоматического отключения;
- знаки безопасности.

СИЗ:

- Костюмы изолирующие: (пневмокостюмы, гидроизолирующие костюмы);
- Средства защиты органов дыхания: (противогазы, респираторы, самоспасатели);
- Одежда специальная защитная: (халаты, костюмы; куртки, рубашки, брюки, шорты);
- Средства защиты ног: (сапоги, ботинки, туфли);
- Средства защиты рук: (рукавицы, перчатки);
- Средства защиты головы: (каска защитные, шапки, береты, шляпы, колпаки, косынки, накомарники);
- Средства защиты глаз: (очки защитные);
- Средства защиты лица: (щитки защитные лицевые);
- Средства защиты органа слуха: (противошумные вкладыши, противошумные наушники).

Производственный шум

Вентиляция производственных помещений предназначена для уменьшения запыленности, задымленности и очистки воздуха от вредных выделений производства, а также для сохранности оборудования. Она служит одним из главных средств оздоровления условий труда, повышения производительности и предотвращения опасности профессиональных заболеваний. Система вентиляции обеспечивает снижение содержания в воздухе помещения пыли, газов до концентрации, не превышающей ПДК. Проветривание помещения проводят, открывая форточки. Проветривание помещений в холодный период года допускается не более однократного в час, при этом нужно следить, чтобы не было снижения температуры внутри помещения ниже допустимой. Воздухообмен в помещении можно значительно сократить, если улавливать вредные вещества в местах их выделения, не допуская их распространения по помещению. Для этого используют приточно-вытяжную вентиляцию. Кратность воздухообмена не ниже 3.

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума - это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Максимальный уровень звука постоянного шума на рабочих местах не должно превышать 80 дБА. В нашем случае этот параметр соответствовал значению 75 дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть СКЗ и СИЗ.

СКЗ:

- устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;
- изоляция источников шума от окружающей среды средствами звуко- и виброизоляции, звуко- и вибропоглощения;
- применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения;

СИЗ:

- применение спецодежды, специальной обуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

Тепловое излучение

В лаборатории в результате технологического процесса имеет место тепловое излучение газоразрядных трубок. Материалом теплоизоляции используется пенофол. При нагревании и охлаждении утеплителя не выделяются вредные газы, материал защищает помещение от влажности, звуковых волн, сквозняков и радиации.

Интенсивность теплового облучения работающих от нагретых

поверхностей технологического оборудования, осветительных приборов, инсоляции на постоянных и непостоянных рабочих местах не должна превышать 35 Вт/м² при облучении 50% поверхности тела и более, 70 Вт/м² - при величине облучаемой поверхности от 25 до 50% и 100 Вт/м² - при облучении не более 25% поверхности тела в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 12.1.005. -88.

Для снижения теплового излучения по ГОСТ 12.4.123 – 83 предусматриваются следующие меры СКЗ и СИЗ:

СКЗ:

- тепловая изоляция горячих поверхностей с температурой наружной поверхности более 45 °С;
- специальная сигнальная окраска для предохранения работающих от ожогов;
- ограждения по ГОСТ 12.2.062-82;
- вентиляция;

СИЗ:

- применение спецодежды, специальной обуви и защитных средств:(брезентовые или суконные костюмы, очки со светофильтрами, щитки из органического стекла и др.)

6.1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований

Факторы электрической природы

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статистического электричества.

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В, с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и

свыше 1000 В (помещения особо опасные).

В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

1. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.

2. Помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

3. Особо опасные помещения, которые характеризуются наличием оборудования свыше 1000 В и одного из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности. Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям.

При подключении локального заземления к нейтрали трансформатора / генератора в системе TN суммарное сопротивление заземления (локального + всех повторных + заземления трансформатора / генератора) должно быть не более 4 Ом (ПУЭ 1.7.101). Напряжение составляет менее 36 В. Сила тока должна быть менее 0,1 ампера.

Исследовательская лаборатория относится к классу повышенной опасности по поражению электрическим током от 380 В до 0,4 кВ, напряжение освещения 220 В, напряжение ручных ламп не более 12 В.

Общее требование по электробезопасности выполнять в соответствии с

ГОСТ 12.1.019 – 79 и ПУЭ.

Для обеспечения электробезопасности предусматривается СКЗ и СИЗ:

СКЗ:

- заземление, зануление токоведущих частей оборудования по ГОСТ 12.1.030 – 81 и ПУЭ; Сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединены нейтрали генераторов (трансформаторов) или выводы однофазного источника питания электроэнергией, с учетом естественных заземлителей и повторных заземлителей нулевого провода должно быть не более 2,4 и 8 Ом соответственно, при междуфазных напряжениях 660, 380 и 220 В трехфазного источника питания или 380, 220 и 127 В однофазного источника питания.
- ограждение и изоляция оборудования и токопроводов по ГОСТ 12.1.030 – 81 и ПУЭ;
 - недоступность проводов (двойная изоляция);
 - автоматическое отключение и блокировка при аварии.

СИЗ:

- диэлектрические перчатки, боты, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления.

К общей системе заземления подключают все металлические части оборудования, не находящиеся под напряжением, но которые могут оказаться под током вследствие замыкания под корпус.

Метеоусловия

Микроклимат в производственных условиях определяется следующими параметрами:

- 1) температура воздуха;
- 2) относительная влажность воздуха;
- 3) скорость движения воздуха.

При высокой температуре воздуха в помещении кровеносные сосуды

кожи расширяются, происходит повышенный приток крови к поверхности тела, и выделение тепла в окружающую среду значительно увеличивается. При низкой температуре окружающего воздуха реакция человеческого организма иная: кровеносные сосуды кожи сужаются, приток крови к поверхности тела замедляется, и теплоотдача конвекцией и излучением уменьшается. Таким образом, для теплового самочувствия человека важно определенное сочетание температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне.

Повышенная влажность воздуха ($\phi > 85\%$) затрудняет терморегуляцию организма, т.к. происходит снижения испарения пота, а пониженная влажность ($\phi < 20\%$) вызывает пересыхание слизистых оболочек дыхательных путей. Оптимальные и допустимые показатели температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 6.1. [ГОСТ 12.1.005-88].

Для обеспечения оптимальных и допустимых показателей микроклимата в холодный период года следует применять средства защиты рабочих мест от остекленных поверхностей оконных проемов, чтобы не было охлаждения. В теплый период года необходимо предусмотреть защиту от попадания прямых солнечных лучей.

Работы делятся на три категории тяжести на основе общих энергозатрат организма. Работа, относящаяся к инженерам – разработчикам, относится к категории легких работ. Допустимые значения микроклимата для этого случая даны в таблице 6.2.

Таблица 6.2. – Требования к микроклимату

Период года	Категория работы	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	средняя	19 – 24	15 - 75	≤ 0.1
Теплый	средняя	20 - 28	15 - 75	≤ 0.2

Одними из основных мероприятий по оптимизации микроклимата и состава воздуха в производственных помещениях являются обеспечение надлежащего воздухообмена и отопления, тепловая изоляция нагретых поверхностей оборудования, воздухопроводов и гидротрубопроводов.

Освещенность

В помещении исследовательской лаборатории предусматривается освещение в соответствии со СНиП 23 – 05 – 95:

- искусственное, комбинированная система. Источники освещения: газоразрядные ртутные лампы низкого давления;
- рабочее, для освещения помещения в соответствии с характером выполняемых работ применяют люминесцентные лампы низкого давления дневного света с исправленной цветностью ЛДЦ, и дневного света ЛД со светильниками рассеянного света типа ОД, ОДОР, пыле водозащищённые типа ПВЛМ, ППР;
- аварийное, для продолжения работ при отключении рабочего освещения (питание от независимого источника энергии, аккумуляторных батарей) с лампами накаливания в универсальных светильниках прямого света типа Астра, УПМ – 15, светильник типа ПСХ;
- эвакуационное (по основным проходам и лестничным клеткам).

Согласно СНиП 23-05-95 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 200 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые

создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки не должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения $A=6.5\text{м}$, ширина $B=7\text{м}$, высота $=3,5\text{м}$. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 1,0\text{ м}$. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 200 Лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:

$$S = A \times B,$$

где A – длина, м;

B – ширина, м.

$$S = 45,5\text{ м}^2$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c=50\%$, свежепобеленного потолка $\rho_{\text{п}}=70\%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_z=1,5$. Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп $Z=1,1$. Выбираем лампу дневного света ЛД-30, световой поток которой равен $\Phi_{\text{ЛД}} = 1800\text{ Лм}$.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна $x=1227\text{ мм}$, ширина – $y = 265\text{ мм}$.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем $\lambda = 1,1$, расстояние

светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса;

h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР: $h_n = 3,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью вычисляется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2,0 \text{ м.}$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2 = 2,2 \text{ м}$$

Число рядов светильников в помещении:

$$Nb = \frac{B}{L} = \frac{7}{2,2} = 3,18 \approx 3.$$

Число светильников в ряду:

$$Na = \frac{A}{L} = \frac{6,5}{2,2} \approx 3.$$

Общее число светильников:

$$N = Na \cdot Nb = 3 \cdot 3 = 9.$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$l_1 = \frac{L}{3} = \frac{2,2}{3} = 0,73 \text{ м,}$$

$$l_2 = \frac{A - L \cdot 2 - 3 \cdot y}{2} = \frac{6,5 - 2,2 \cdot 2 - 3 \cdot 0,265}{2} = 0,65 \text{ м.}$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке 6.1. изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

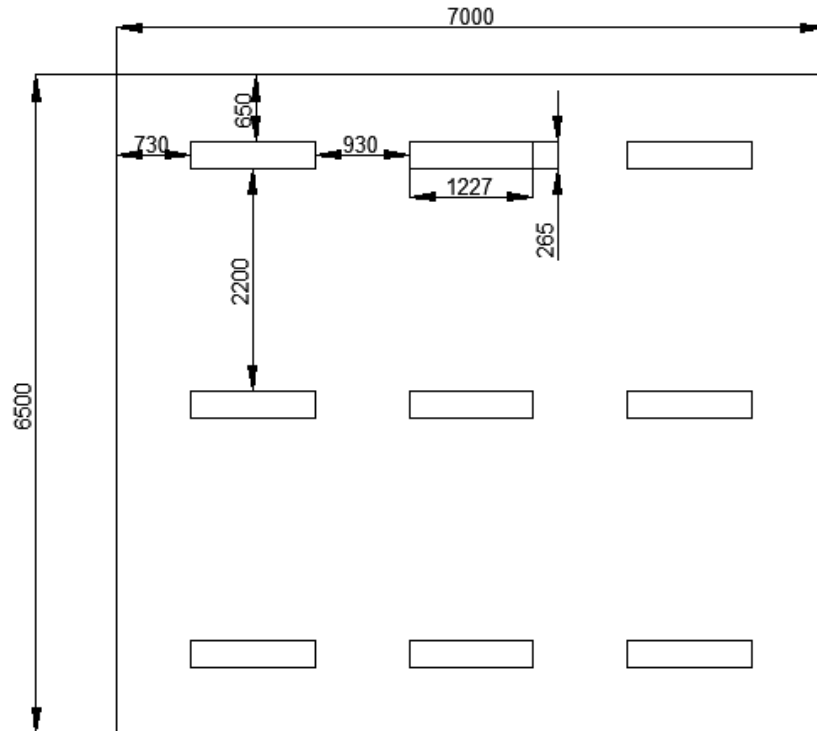


Рисунок 6.1. – План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)} = \frac{6,5 \cdot 7}{2 \cdot (6,5 + 7)} = 1,69.$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при $\rho_{\text{П}} = 70 \%$, $\rho_{\text{С}} = 50\%$ и индексе помещения $i = 1,6$ равен $\eta = 0,47$.

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_{\text{з}} \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 6,5 \cdot 7 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{18 \cdot 0,47} = 1775 \text{ лм.}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}} / \Phi_{\text{ЛД}} \cdot 100\% \leq 20\%;$$

$$\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}} / \Phi_{\text{ЛД}} \cdot 100\% = 1800 - 1775 / 1800 \cdot 100\% = 1.4\%.$$

Таким образом: $-10\% \leq 1.4\% \leq 20\%$, необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Факторы пожарной и взрывной природы

Исследовательская лаборатория относится к категории В1 по НПБ – 105-95, III степени огнестойкости здания с пределом огнестойкости СНИП 21.01-97*: ограждений R 120, перекрытий RYE 60, лестничных клеток RYE 120. Основными причинами пожаров являются:

- возгорание пожароопасных веществ;
- замыкание электропроводки;
- электрогазосварочные работы;
- возгорание электродвигателей.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000 В. Кроме того, порошковые применяют для тушения документов.

Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например, ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Здание должно соответствовать требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации (рисунке 6.2.), порошковых или углекислотных огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.

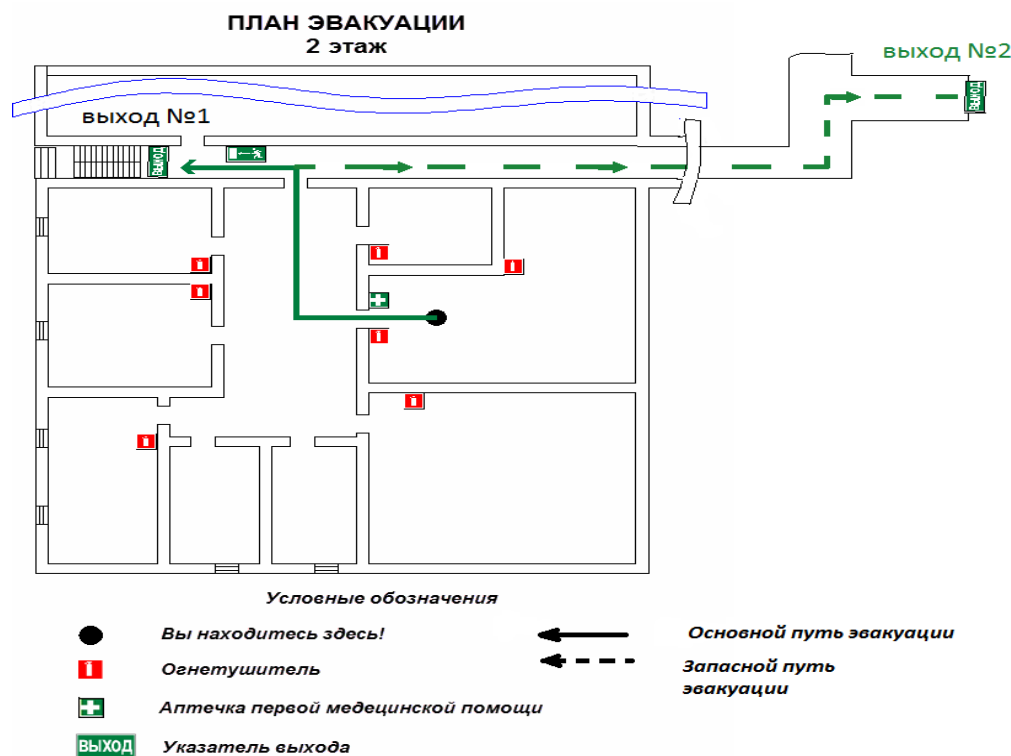


Рисунок 6.2 – План эвакуации в случае чрезвычайной ситуации

6.2 Экологическая безопасность

Охрана окружающей среды – это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения – это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

Для перехода к безотходным производствам в лаборатории необходимо осуществлять сбор водорода в специальные емкости (в настоящее время он выпускается в воздух).

Так же необходимо позаботиться о раздельных контейнерах для отходов бытового характера: отдельные мусорные баки для бумаги, стекла,

металлических частей, пластика. Необходимо заключить договор с компанией, вывозящей мусор, чтобы она обеспечивала доставку разделенных отходов фирмам, занимающимся переработкой отходов.

Над каждым рабочим местом имеется вытяжная система, которая снабжена специальными фильтрами для очистки воздуха от микрочастиц. После происходит утилизация или очистка фильтров в специализированных компаниях согласно технологическому процессу.

Лазерные установки не оказывают влияние на гидросферу и литосферу земли, так как отсутствуют сбросы в гидросферу и литосферу. При работе лазера не происходит загрязнение тяжелыми металлами, вредными химическими веществами и воздействие вибрации.

Экологическая безопасность отражена в документе СанПиН 5804-91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров.

6.3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и пожар

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приведет к авариям систем теплоснабжения и жизнеобеспечения, приостановке работы, обморожениям и даже жертвам среди населения.

В случае переморозки труб должны быть предусмотрены запасные обогреватели. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

На случай возникновения чрезвычайной ситуации (землетрясение, наводнение, пожары, химическое либо радиоактивное заражение и т.п.) должен быть предусмотрен следующий комплекс мероприятий:

- рассредоточение и эвакуация;
- укрытие людей в защитных сооружениях;
- обеспечение индивидуальными средствами защиты;
- организация медицинской помощи пострадавшим;
- организация служебного транспорта для эвакуаций людей.

Возгорание оборудования при нарушении герметичности газоразрядной трубки лазера; при перегреве токоведущих частей источника накачки лазера; при коротком замыкании в источнике питания.

Одним из видов ЧС является пожар. Превентивные меры по предупреждению возгораний: Проводятся инструктажи по технике безопасности: первичный, вводный и повторный (два раза в год), так же необходимо следить за состоянием электрической проводки, не оставлять без присмотра включенные электронагревательные приборы (паяльник), не пользоваться без навыков горючими и легковоспламеняющимися жидкостями (ацетон, бензин). При возгорании в срочном порядке необходимо сообщить о пожаре по телефону 01, дать сигнал тревоги, принять меры по эвакуации людей. В срочном порядке покинуть помещение. При возможности приступить к устранению пожара с помощью имеющихся средств пожаротушения.

6.4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Лазерные изделия, кроме классов 1, 2 и 3А. как правило, должны эксплуатироваться в специально выделенных помещениях либо могут располагаться в открытом пространстве на фундаментах или платформах транспортных средств.

Помещения должны соответствовать требованиям пожарной безопасности и иметь необходимые средства предотвращения пожара и противопожарной защиты.

Требования по пожаро- и взрывобезопасности разрабатываются с учетом технических характеристик лазерных изделий и условий их эксплуатации и

должны соответствовать ГОСТ 12.1.004, ГОСТ 12.1.010 и другим регламентирующим документам.

Отделку помещений следует выполнять только из негорючих материалов. Не допускается применение глянцевых, блестящих, хорошо (зеркально) отражающих лазерное излучение материалов (коэффициент отражения рекомендуется не более 0,4).

Двери помещений должны иметь знак лазерной опасности (приложение Б). Кроме того, двери помещений, в которых эксплуатируются лазеры классов 3В и 4, должны быть оборудованы специальным замком и дополнительно

Контроль освещенности рабочей зоны в соответствии с ГОСТ 24940 и СНиП 11—4—79. Следует предусматривать необходимые способы регулирования освещенности и дежурное освещение. При проектировании помещений для лазерных изделий классов 3В и 4 следует проверить необходимость применения санитарного и функционального зонирования по лазерной безопасности.

В конкретных случаях схемы зонирования и взаимного расположения помещений зависят от вида, мощности и назначения лазерных изделий, масштаба работ, пролетов и шагов применяемых строительных конструкций.

К помещениям, в которых лазерные изделия используются в технологических целях (то есть используются как средства производства), предъявляются дополнительные требования.

Высота помещений должна быть не менее 3,5 м. Коммуникации (вода, электроэнергия, воздух, вакуумсистемы, инертные газы и др.) следует прокладывать под полом в специальных каналах с защитными коробами (возвышение над уровнем пола не допускается) или подвешивать кабели на высоте не менее 2,2 м от пола.

При проектировании помещений, при необходимости, предусматриваются устройства подъемно-транспортных механизмов, применяемых для монтажа и демонтажа исследовательского и инженерного оборудования, а также для работы с образцами (мишенями).

Допустимые уровни шума в помещении должны соответствовать ГОСТ 12.1.003. В случае превышения нормируемых величин предусматривают дополнительную изоляцию рабочих помещений звукоизолирующим или поглощающим материалом и индивидуальные средства защиты.

Воздух рабочей зоны в рабочих помещениях должен соответствовать оптимальным в соответствии с ГОСТ 12.1.005. Допустимые нормы содержания ионов в воздухе рабочего помещения должны соответствовать СанПиН 2152 с Дополнением к ним от 14.09.83.

Требования по санитарному ограничению содержания вредных химических и токсических веществ в воздухе рабочей зоны и контроль должны соответствовать ГОСТ 12.1.005 и ГОСТ 12.1.014.

Помещения должны иметь проточно-вытяжную вентиляцию. При необходимости, рабочие места должны быть оборудованы местной вытяжкой с целью исключения попадания в рабочее помещение продуктов взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемыми материалами.

1 ГОСТ 12.1.007-76. «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».

2 ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

3 СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

4 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

5 ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.

6. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

7 ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

8 ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности.

9 ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты.

10 САНИТАРНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАЗЕРОВ СанПиН 5804-91

11 Государственный стандарт РФ ГОСТ Р 50723-94 "Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий"

Графические материалы

- 1) Освещенность на рабочем месте
- 2) Пути эвакуации

Заключение

В диссертации представлен метод повышения эффективности возбуждения CuBr-лазера путем модификации разрядного контура. Для этого в разрядном контуре использовался импульсный кабельный автотрансформатор. Использование импульсного автотрансформатора, позволяет увеличить энерговклад в активную среду до начала импульса генерации практически в 1,5-2 раза. При этом мы наблюдаем снижение общего энерговклада в среду, порядка 15-20%. Без использования обострительного конденсатора повышения мощности генерации не наблюдалось, несмотря на увеличение энерговклада, амплитуды импульса напряжения и скорости нарастания тока через ГРТ. Включение в контур обострительного конденсатора позволяет обеспечить задержку развития тока через ГРТ относительно начала формирования импульса напряжения на ней. Обострительный конденсатор обеспечивает некоторую задержку начала развития тока через ГРТ относительно импульса напряжения, это позволяет увеличить энергию в трубе в начальный момент времени, что в свою очередь ведет к увеличению вероятности заселения резонансных уровней, так как энергия возбуждения электронов увеличивается. В совокупности с увеличением энерговклада до начала импульса генерации за счет использования импульсного автотрансформатора достигается увеличение эффективности возбуждения лазера в 1,5 раза. Путем незначительной модификации схемы разрядного контура средняя мощность генерации повысилась с 0,69 до 1,12 Вт при сохранении мощности, потребляемой источником от сети. При этом увеличивается общий КПД лазерной установки.

Список использованных источников

- 1) Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов: монография. ТПУ. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 276 с.
- 2) Петраш Г.Г. Импульсные газоразрядные лазеры // Успехи физ. наук. – 1971. – Т. 105. – Вып. 4. – С. 645 – 676.
- 3) Григорьяниц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди. – М.: Физматлит, 2005. – 312 с.
- 4) Евтушенко Г.С., Шиянов Д.В., Торгаев С.Н., Тригуб М.В., Шиянов Д.В. Скоростные усилители яркости на индуцированных переходах в парах металлов. – Томск: STT. – 2016. – 246 с.
- 5) Соломонов В.И. Некоторые характеристики лазеров на самоограниченных переходах в парах марганца и свинца // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6. – № 6. – С. 1252-1256.
- 6) Little C.E. Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. – Chichester (UK): John Willey & Sons Ltd., 1998. – 620 p.
- 7) Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. - Новосибирск: Наука, 1985. - 152 с.
- 8) Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Молодых Э. И., Климовский И. И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. – М.: Научная книга, 1998. – 544 с.
- 9) Astadjov D.N., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Effect of hydrogen on CuBr laser power and efficiency // Optics Commun. 1985. - Vol.56.- №4. - P.279-282.
- 10) Pulsed Metal Vapor Lasers: Proceeding of the NATO Advanced Research Workshop on Pulsed Metal Vapor Lasers – Physics and Emerging Applications in Industry, Medical and Science. St. Andrews (UK), Aug. 6-10, 1995 / Ed. By C. E. Little, N. V. Sabotinov. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. – 479 p.
- 11) Григорьяниц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 300 с.

- 12) Лябин Б.А., Жариков В.М., Клименко В.И. и др. Лазеры на парах меди и их применение в технологии прецизионной обработки // Электронная техника. Сер. СВЧ – техника. – 2003. – Вып. 2. – № 482. – С. 2 – 10.
- 13) М.В. Тригуб, Д.Н. Огородников, В.А. Димаки. Исследование источника накачки лазера на парах металлов с импульсным зарядом рабочей емкости. // Оптика атмосферы и океана, 2014. – Т. 30. – № 6. – С. 1-4.
- 14) Фогельсон Т.Б., Бреусова Л.Н., Вагин Л.Н. Импульсные водородные тиратроны. – М.: Советское радио. - 1974. – 211 с.
- 15) Месяц Г.А., Насибов А.С., Кремнев В.В. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения, М., «Энергия», 1970. – 155с.
- 16) Насибов А.С. Импульсный трансформатор с обмотками из коаксиального кабеля. // «Электричество». – №2. – 1965. – с. 26 – 29.
- 17) Насибов А.С. Кабельный трансформатор для формирования высоковольтных наносекундных импульсов // Препринт. – № 50. – ФИАН. – 1967. – с. 30 – 35.
- 18) Ицхоки Я.С. Импульсные и цифровые устройства // издательство «Советское радио», 1959. – 729 с.
- 19) Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – Изд. 3е, перераб. и доп. М.: «Энергия», 1968. – 488 с.
- 20) Recser G.A. Now magnetic materials behave at nanosecond pulse width. // Electronics. – v. 34. – № 36. – 1961. – p. 72-75.
- 21) Басов Н.Г., Амбарцумян Р.В., Зуев В.С., Крюков П.Г., Стойлов Ю.Ю. Оптический квантовый генератор с импульсным включением добротности // ЖЭТФ. – т.47. – № 10. – 1964. – с. 1595.
- 22) Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. – Изд. 2е, перераб. М.: «Энергия», 1974. – 240 с.
- 23) Исаев А.А., Петраш Г.Г. Исследование импульсных газовых лазеров на атомных переходах. – «Наука». – Т. 81. – 1975 – 186 с.
- 24) Бурмакин В.А., Евтюнин А.Н., Лесной М.А., Былкин В.И. // Квантовая электроника, 1978. – Т. 5. – № 5. – С. 1000 – 1004.

- 25) Беляев В. П., Зубов В. В., Лесной М. А., Лябин Н. А., Чурсин А. Д., Воробьев О. Д. // Электронная промышленность. – Т. 3. – 1981. – С. 35.
- 26) Петраш Г.Г. Исследование лазеров на парах меди // УФН. – Т. 105. – № 4. – 1971. – С. 645 – 676.
- 27) Исаев А.А., Леммерман Г.Ю. Эффективный импульсный лазер на парах меди с высокой средней мощностью генерации // Квантовая электроника. – Т. 4. – № 7. – 1977. – С. 1413 – 1417.
- 28) В. В. Зубов, Н. А. Лябин, В. И. Мишин, М. Л. Мучник, Г. Д. Паршин, Е. Я. Черняк, А. Д. Чурсин. Исследование лазера на парах меди с большим ресурсом и улучшенными параметрами импульса возбуждения // Квантовая электроника. – Т. 6. – № 5. – 1979. – С. 1908 – 1910.
- 29) Ю. А. Бабейко, Л. А. Васильев, А. В. Свиридов, А. В. Соколов, Л. В. Татаринцев. Кпд лазера на парах меди // Квантовая электроника. – Т. 10. – № 9. – 1983. – С. 1102–1105
- 30) ГОСТ 11326.4 – 79; Кабель радиочастотный марки РК– 50 – 7– 11. Технические условия. Официальное издание, введ.01.01.1981 – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 6 с.
- 31) Электрическая прочность материалов – [Электронный ресурс <http://tehtab.ru>] – открытый режим доступа:(<http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnethism/ElectricalHardnessMaterials/ElectricalHardnessMaterialsANDAirsmall/>) – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 15.03.2018).
- 32) Мешков А.Н. Магнитные генераторы мощных наносекундных импульсов // ПТЭ. – № 1. – 1990. – С. 22-40.
- 33) Ферритовые кольца – Завод «Магнетон» [Электронный ресурс <http://www.magneton.ru>]- открытый режим доступа: <http://www.magneton.ru/cat.php?id=134> – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 17.03.2018).
- 34) Л. А. Меерович, И. М. Ватин, Э. Ф. Зайцев, В. М. Кандыкин. Магнитные генераторы импульсов. «Советское радио». – 1968. – 600 с.

- 35) Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера. – 2006. – 632 с.
- 36) Тригуб М.В., Власов В.В., Шиянов Д.В., Троитский В.О., Суханов В.Б. Повышение эффективности возбуждения CuBr – лазера за счет модификации разрядного контура. // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30. – № 12. – С. 1069-1072.
- 37) Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б. CuBr-Ne-H₂(HBr) лазер с высокой частотой следования импульсов // Докл. Симпозиума "Лазеры на парах металлов". – 25-29 сентября 2006 г. – Ростов-на-Дону. – 2006 г.1. – С. 8.
- 38) ГОСТ 12.1.007-76. «ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».
- 39) ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
- 40) СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
- 41) СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
- 42) ГОСТ 12.4.123-83. Средства коллективной защиты от инфракрасных излучений. Общие технические требования.
- 43) ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
- 44) ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
- 45) ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности.
- 46) ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда. Устройства, экранирующие для защиты от электрических полей промышленной частоты.
- 47) САНИТАРНЫЕ НОРМЫ И ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАЗЕРОВ СанПиН 5804-91

48) Государственный стандарт РФ ГОСТ Р 50723-94 "Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий"

Приложение А
(Обязательное)

Раздел магистерской диссертации, выполненный на иностранном языке

The cable pulse transformer as an element of the laser's power supply

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ТМ61	Рахимжанов Асхат Темирбулатович		

Консультант – отделения материаловедения:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, с.н.с. ИОА СО РАН	Тригуб Максим Викторович	Кандидат технических наук		

Консультант – отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель, отделение иностранных языков	Квашнина Ольга Сергеевна			

The self-capacitance and inductance of the generator's discharge circuit have a significant influence on the parameters of a pulse. Value of these parasitic parameters is determined by the size of the setup; it increases with increasing dimensions of this setup. For that matter, demands of reducing the pulse rise time and pulse on time in general and increasing the pulse amplitude are inconsistent. As the current and voltage increase, dimensions of the pulse setup increase, and with them, parasitic parameter values also increase. To eliminate these contradictions, coaxial constructions with distributed parameters can be used. One of these constructions includes a pulse transformer with a coaxial cable coil [1].

The use of this device reduces parasitic capacitance and inductance. Moreover, the dimensions of this system are much smaller compared to traditional pulse transformers. Small dimensions are achieved by using continuous cable cord as a secondary winding, and a braid of the same cable as a primary winding. Common pulse transformers that are used in the microsecond interval are not suitable for use in laser technology, since the thickness of the insulation increases with increasing pulse amplitude, which affects the size of the transformer that distorts the pulse in the increase direction. Moreover, in order for the transformer to be installed in the laser casing it is necessary to minimize the dimensions of the transformer. But for a transformer on lengths of a long line there are disadvantages in the form of need to apply a large number of decoupling impedances. It can be eliminated by using a winding with a coaxial cable on a common pulse transformer with a ferromagnetic core.

Chapter A1. The cable pulse transformer (CPT) for power supplies of self-terminating lasers

A1.1 General information about self-terminating lasers

In metal vapor lasers, the active particles are metal atoms or ions. In other words, laser generation is achieved on the transitions of metal ions and atoms that are used as an active laser substance.

Excitation of gas lasers implies, first of all, the transition of the active substance from the initial state to the gas state. This transition is carried out by heating the metallic elements, as a result of which their gradual evaporation takes place [1].

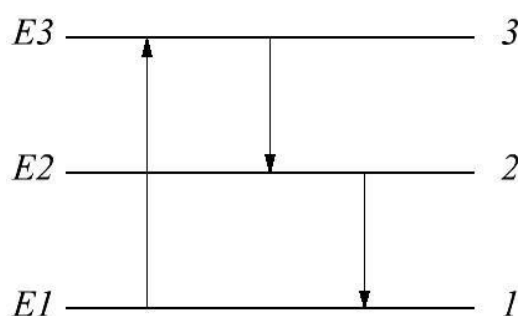
There are several methods for ensuring the melting point of the active substance. One of them is using an external heating furnace located in the region of the active zones of the gas-discharge tube. Using this method allows us to increase the efficiency of the laser due to additional power consumption from the furnace.

The modification of this method is the location of laser substance in special compartments of gas-discharge tubes, which are connected with external heating elements. As a result of heating, vapors of laser matter are formed that fill the gas-discharge tube followed by excitation of laser-active material.

This method is convenient and structurally simple. In addition, it can be used for self-heating mode of a gas-discharge tube.

After the formation of active substance vapors, active substance is excited by the conversion of external energy into the energy of a gas discharge. This process can be both pulse and continuous depending on laser type. Excitation of active particles leads to a violation of the equilibrium distribution of atoms over energy levels and the creation of an inverted population, which is a necessary condition for the onset of laser generation. The mechanism of excitation of the active substance is called pumping [1-4].

Among all lasers types, there is a separate group of lasers generated on self-limited transitions. A distinctive feature of these lasers is the self-limited generation, due to the ratio of the lifetimes of atoms at their working levels [1].



1 - basic quasistatic level, 2 - lower metastable level, 3 - upper resonant level

Figure A.1 - Diagram of energy levels with self-limited transitions between them

Figure A1 schematically illustrates the self-limited generation. As a result of the pumping process, the upper resonant level (3) is actively populated. The lower metastable level (2) is populated as a result of the forced transition of excited atoms from the resonance level after the expiration of their lifetime. This transition is accompanied by the emission of a quantum of light. The generated photon is usually called "seed". The emitted photon, interacting with excited atoms, causes the creation of another similar photon. Since the spectrum of energy values of atoms of the same metal is identical, the stimulated emission generated by the "seed" photon creates an avalanche of identical photons - this is the cause of the coherence, monochromaticity and directivity of stimulated emission [1-4, 13].

The process of gas lasers excitation, as a rule, is an electric discharge in a sealed vessel, which is an active element. The construction of such an active element comprises typically two electrodes separated by a ceramic sealed tube filled with metal vapors at a relatively low partial pressure (10^{-3} - 10^{-1}) torr. In the absence of voltage on the electrodes or at its low absolute value, the tube is an almost ideal insulator.

When a potential difference occurs between the electrodes, a gas discharge tube starts to conduct current. Further, the excited electron transfers energy to the active particles, thereby triggering the mechanism of generation of stimulated induced emission. Generation of lasers on self-limited transitions is achieved through pulse excitation [1-4].

In addition, in the gas discharge tube there is a buffer gas, the pressure of which can reach very high values of about 300 torr. Helium, neon and hydrogen are most commonly used buffer gases. The concentration of the buffer gas determines the breakdown voltage of the gaseous medium and contributes to the creation of an inverted population [1-4, 13].

Since the temperature range for metal halide vapor lasers is relatively narrow, in this case the gas-discharge tubes are universal laser emitters. It is also possible to use different laser substances in one gas discharge tube, which provides laser generation on several lines simultaneously.

The most attractive characteristics of resonantly - metastable generating on self-limited transitions lasers are high efficiency, high beam quality, and high average and peak power in the ultraviolet, visible and near infrared spectral regions [10-13].

A1.2 Pulse transformer with coaxial cable winding

The pulse transformer winding connection on a ferromagnetic core with a winding of a coaxial cable: transformer ratio $n = 3$, is shown in Figure A.2.

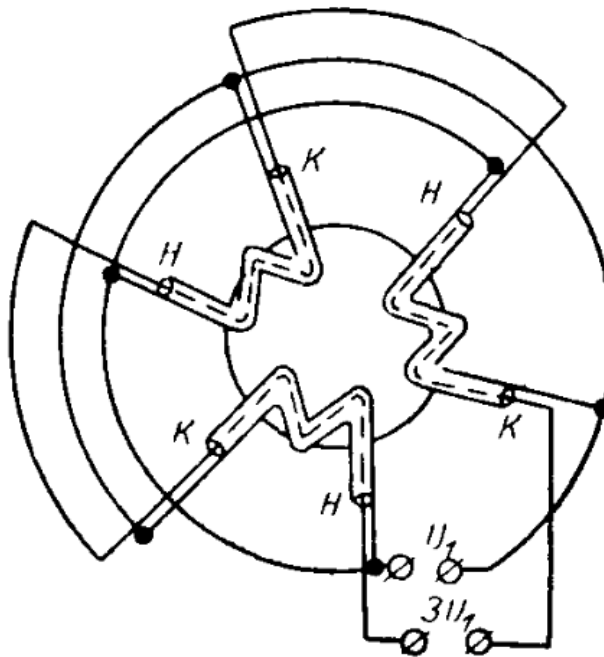


Figure A.2 - The diagram of windings connection of the "cable" pulse transformer:
with transformer ratio $n=3$

The winding is assembled from several segments of a coaxial cable. In this case, the number of segments is 3. The beginnings and ends of the cable braid are connected in parallel and thus form the primary transformer winding. The cable segments cords are connected in series and thus form the secondary winding. The number of cable lengths corresponds to the transformation ratio n .

To increase a winding inductance, the cable is necessary for reeling up on the core executed from a ferromagnet. In case of the reception of short impulses, it is possible to consider ferrite as the best material for the core.

Parasitic parameters of the transformer are defined with an accuracy sufficient for the experiment, through the running cable parameters. The big stock of pulse electric strength at coaxial cables allows us to obtain short impulses with high amplitude, the order of tens kV, on the transformer output. One of the main advantages of the cable transformer is stability to strong dynamic influences, which occur when greater current impulses pass through windings. Proceeding from this property, it is possible to use such transformer for the formation of pulsed current of sufficient value.

The maximum pulse amplitude at the output of the «cable» pulse transformer depends of the coaxial cables impulse electrical strength.

Further, the basic reasons for calculation of parameters of the cable pulse transformer are provided and the principle of high-voltage nanosecond impulses formation is shown.

A1.3 Calculation of transformer's equivalent circuit elements

The cable pulse transformer capacity is defined by the capacity per unit length C_0 . For convenience of the analysis of processes in the transformer circuit, the winding distributed capacity is replaced with equivalent (dynamic) capacity which is led to primary winding's coils (to a primary winding electric potential difference U_1).

The dynamic capacity differs from static, and its value can be determined by using the windings reserved energy. After solving the “how to calculate dynamic capacity” problem, it is possible to see [2, 3] that for the cable pulse transformer the

dynamic capacity should be calculated using the following formula (1)

$$C = \frac{n \cdot (n \pm 1) \cdot (2 \cdot n \pm 1)}{6} \cdot C_0 \cdot l_k, \quad (1)$$

Where: n - transformer ratio;

l_k - length of a piece of cable.

The sign “minus” in the formula (1) shows a case of transformation without variation of pulse polarity. During transformation of an impulse without polarity variation and $n=1$, the value of dynamic capacity, proceeding from formula (1) is equal to zero. The physical sense is that in this case the potentials along a braid (a primary winding) and cable cord (a secondary winding) are equal by sign and value, which indicates that the cable capacity does not charge.

The cable pulse transformer inductance of dispersion depends on how fields between primary and secondary windings are distributed, i.e. between a cable's braid and a cord. As distribution of a field between windings defines capacity per unit length L_0 , it is easy to see that if the cable transformer contains n numbers of cable sections, the secondary winding inductance of dispersion, led to the transformer's primary windings coils L , is defined by the formula

$$L = \frac{L_0 \cdot l_k}{n}, \quad (2)$$

Where: L_0 - cable inductance per unit length;

l_k - length of a piece of cable.

The difference between the cable transformer and pulse transformers with traditional windings is that its primary winding (braid) has no stream of dispersion as it does not have the magnetic stream which has not been connected with a secondary winding (cable cord).

From the formula (2) it can be seen, that cable pulse transformer's inductance of dispersion is determined only by cable inductance per unit length and at the set of a

cable length does not depend on the presence of the core and the form of windings.

To include a degree of pulse front distortion, it is necessary to know the cable characteristic impedance of the cable pulse transformer

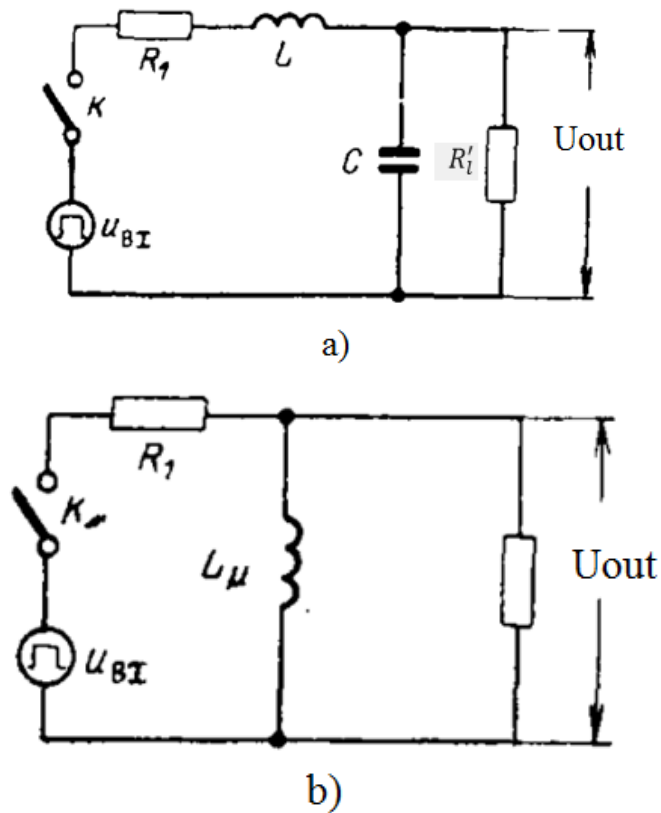
$$\rho = \sqrt{L/C} \quad (3)$$

From formulas (1) and (2) we have:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\frac{6}{(n \pm 1) \cdot (2 \cdot n \pm 1)}}, \quad (4)$$

Where: $\rho_0 = \sqrt{L_0/C_0}$ – cable's characteristic impedance

The minus sign shows a case of transformation without variation of pulse polarity. The sign plus conforms to a case of transformation with variation of pulse polarity.



a)— at high frequencies; b) — at low frequencies.

Figure A.3 - The equivalent circuit of the pulse transformer

The cable pulse transformer's impulse front time value can be calculated after studying and consideration of transitive processes in the pulse transformer diagram (Figure A.3, a) with the parameters for the primary winding coils: R_1 - internal resistance of a source; $R'_l = R_l/n^2$ - resulted resistance of a load.

Analyzing the transitive process in the diagram (FigureA.3,a) it can be seen, that at action of voltage jump on an input of the diagram, the front time per unit of length τ_{f0} counting upon 1 m of a winding (pulse front time on an output) with sufficient accuracy for engineering calculation is defined by the formula (5) in which L , C and ρ are calculated by the formulas (1-4):

$$\tau_{f0} = \theta \cdot (1,2 + 2 \cdot \xi^2), \quad (5)$$

Where

$$\begin{cases} \xi = \frac{\sqrt{k}}{2} \cdot \left(\frac{\rho}{R'_l} + \frac{R_1}{\rho} \right); \\ \theta = \sqrt{k \cdot L \cdot C}; \\ k = \frac{R'_l}{R_1 + R'_l}. \end{cases} \quad (6)$$

On the basis of (6) it is found that

$$R'_H = \frac{\rho \cdot \sqrt{k}}{\xi \mp \sqrt{\xi^2 - \xi_{min}^2}}, \quad (7)$$

Where $\xi_{min} = \frac{R_1}{R_1 + R'_l}$ - the minimal value which is defined at examination of the formula for finding ξ , on a minimum.

From formulas (6, 7) it is possible to calculate the dependence $\tau_{f0} = f(R'_l)$ at known values ρ_0, C, n, k .

Figure A.4 shows the dependency graph $\tau_{f0} = f(R'_l)$ for the pulse transformer in which the coaxial cable is used as a winding with $\rho_0 = 50 \text{ Ohm}$ and $C_0 = 100 \text{ pF/m}$ parameters. These values ρ_0 and C_0 nearly conform to characteristic impedance and capacity per unit length for the majority of coaxial cables which can be used as windings of cable pulse transformers. From the graphs, in Figure 4, with known cable length and value of the resulted resistance, it is possible to calculate the pulse front time with sufficient accuracy using the formula

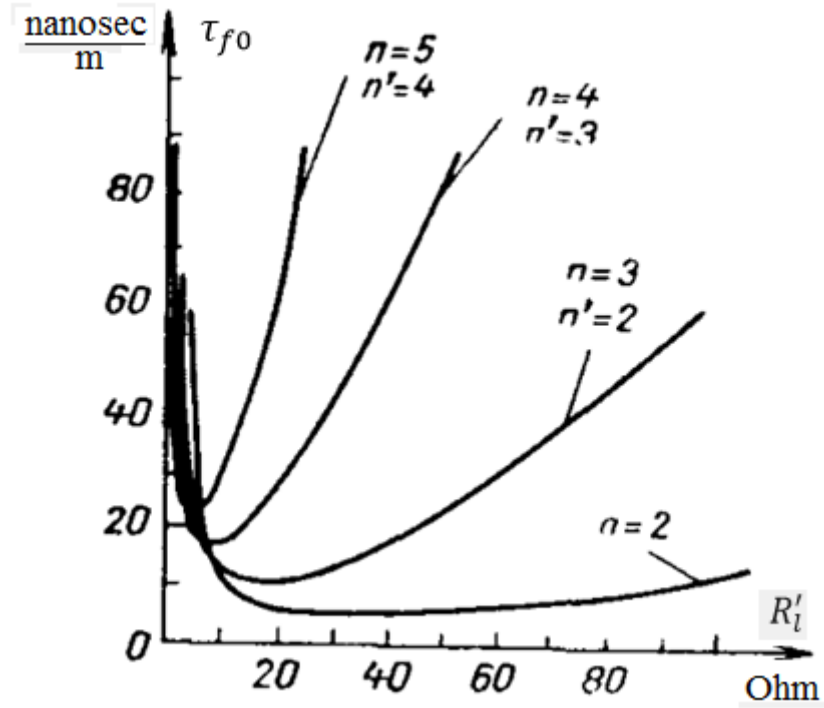
$$\tau_f = \tau_{f0} \cdot l_k \quad (8)$$

Considering the graphs in Figure A.4, it is possible to conclude:

1. For a cable about $\rho_0 = 50 \text{ Ohm}$ and $C_0 = 100 \text{ pF/m}$, at values of the transformer ratio from 2 up to 4, the minimal value of pulse time is observed at R_l value of several hundred Ohm, it conforms to power in some tens megawatt at a full involvement of a coaxial cable on pulse electric strength.
2. If the primary winding's cable length makes the order of several tens of centimeters, at the transformer ratio of two or three and the load which corresponds to the optimum mode of operation, the pulse front time cannot exceed nanoseconds.

It is necessary to note that at the set pulse time and known amplitude, the cable length of a winding depends on the parameters of a material the core is made of. These parameters include the magnetic permeability μ and the saturation induction B_m , namely: at an increase μ and B_m the cable's length is shortened. The ratio τ_f/τ_p for the chosen model of the core and a material at the set amplitude should be kept. For example, when using nickel-zinc ferrite of type F1-1000 at set amplitude $U_m = 50 \text{ kV}$, the minimal ratio $\frac{\tau_f}{\tau_p} \approx 0.05$.

Generally speaking, beginning with some values of duration of an impulse (for ferrite $\Phi 1-000$ with F1- 1000 with $\tau_p \approx 100 \text{ nsec}$), the value of magnetic permeability depends on a pulse time and has the falling characteristic. Accordingly, the ratio τ_f/τ_p increases.



n — transformation ratio, without change in the pulse polarity; n' — transformation ratio with a change in the pulse polarity.

Figure A.4 - Dependence of the pulse front time on the recalculated load resistance at preset values $\rho_0 = 50 \text{ Ohm}$, $C_0 = 100 \text{ pF/m}$, $k = 0.5$.

A1.4 Determination of the winding turns number and transformer core parameters

Considering how the rectangular pulse acts on the transformer's primary winding and analyzing the equivalent circuit in Figure 2, b we obtained the formulas for calculating such parameters of a pulse transformer as primary winding's number of turns, magnetizing inductance, sag of a pulse. [4].

Number of primary turns:

$$\omega_1 = \frac{U_{in} \cdot \tau_p}{\Delta B \cdot S} \cdot 10^4. \quad (9)$$

magnetizing inductance:

$$L_\mu = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot \omega_1^2 \cdot S}{l_0} \cdot \mu, H. \quad (10)$$

sag of a pulse:

$$\lambda = \frac{\Delta U_{out}}{U_{out}} = \frac{\tau_p \cdot R_1 \cdot R'_l}{L_\mu \cdot (R_1 + R'_l)}. \quad (11)$$

Where U_{out} - primary voltage, V;

U_{out} - on-load voltage, V;

τ_n - pulse on-time, second;

R_1 – equivalent internal impedance of generator, Ohm;

R'_l - reduced on-load resistance, Ohm;

S – core sectional area, cm²;

l_0 - length of the magnetic core's field line, cm;

μ - permeability;

ΔB - value of magnetic induction on the private loop hysteresis curve, T.

Using the formulas (9-11), it is possible to calculate the winding and core parameters. Based on the formulas, we can say that the minimum and maximum number of turns and the magnetizing inductance (and, therefore, minimal front with minimal decline in flat part) can be obtained at the maximum S/l_0 ratio of the core. It is obvious that the more profitable from all points of view (full use of core, reduction of parasitic parameters etc.) is the core in a ring shape form. But there is a limit, which does not provide a large S/l_0 ratio on one ring due to the increased ratio of external and internal diameters. The magnetic field intensity will depend on the length of the magnetic path at one and the same magnetizing force:

$$H = \frac{I_\mu \cdot \omega_1}{l}, \frac{A}{cm}. \quad (12)$$

But due to the significant difference in the diameters l_{in} and l_{out} , rings are different and hence $H_{in} \ll H_{out}$, which in most cases leads to a saturation of the inner part of the ring and, consequently, to the reduction of the core's physical cross-section. The best option for getting greater ratios S/l_0 ($S/l_0 \approx 1 \div 1,5$) is a core consisting of several rings.

When designing a pulse transformer, the magnetic material should possess such properties as:

- 1) the great value of magnetic density, B_M ;
- 2) the great value of magnetic permeability, μ ;
- 3) the great value of volume resistivity, ρ_g ;
- 4) low losses on eddy currents;
- 5) dependence μ on frequency should be minimal.

Practically, there are no magnetic materials which possess all the qualities simultaneously. From the available materials, Permalloy can be used. The advantages of these alloys are a large value of saturation induction and magnetic permeability ($B_M = 0.7-1.5$ T, $\mu \approx 150\,000$). The main disadvantage of Permalloy is low resistance. At short pulse times in order $10^{-8} \div 10^{-7}$ seconds, the value of μ is drastically reduced by eddy currents. In order to reduce eddy currents, the cores are made from sheets of material with a thickness of microns. The downside of using cores from Permalloy is the need to isolate the winding and core from each other.

Ferrite materials have high resistance; this gives the opportunity to use them without extra high voltage isolation. This is one of the main differences of ferrite from permalloys. The dependence of $\mu = f(\tau_p)$ and eddy currents are not so pronounced for ferrite as those for permalloys. The disadvantage of ferrite materials can be relatively low values of B_M and μ .

A1.5 Influence of induction increase rate on operation of the core

During the formation of high-voltage nanosecond pulses, the magnetic induction increase rate can reach large values. The result is excitation of powerful eddy currents in magnetic core, which create strong demagnetization field [5]. In order to compensate for this degaussing field during magnetization of the core, additional current must be used.

In a pulse mode, the so-called apparent magnetization current is taken into account as a normal magnetization current $I_K > I_\mu$. The apparent increase in

magnetizing current leads to an apparent decrease in magnetic core permeability, $\mu_k < \mu$.

An apparent permeability of a magnetic material depends on thickness of a tape of the core δ_g and duration of an impulse τ_p . Relative apparent permeability is a function of the ratio of pulse time to a vortical constant of time θ_v :

$$\mu_k = f\left(\frac{\tau_p}{\theta_v}\right), \quad (13)$$

Where

$$\theta_v = \frac{\mu_\Delta \cdot \delta_g^2}{\pi \cdot 10^3 \cdot \rho_g};$$

δ_g - thickness of core sheets, cm;

ρ_g – specific electrical resistivity, Ohm·cm;

μ_Δ - permeability on the private loop hysteresis curve.

In addition to the influence of eddy currents' degaussing fields, the effect of non-uniform magnetic stream distribution on a magnetic sheet has to be considered. This occurs due to the maximal increment ΔB_M on a surface of a sheet exceeds average size of an increment which is defined by the formula (9).

The ratio of the maximal size of induction increment on a sheet surface to an average increment on a sheet section depending on τ_p is defined by the formula

$$\frac{\Delta B_M}{\Delta B_{mid}} = 1 + \Delta B_{mid} \frac{1}{\tau_p} \cdot \left(\frac{\pi^2}{3} - 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \cdot e^{-k^2 \tau_p} \right). \quad (14)$$

For example, at $t_p = 0.2$ $\Delta B_M \approx 10 \Delta B_{mid}$. Such a big value of ΔB_M is caused by an additional increase in current of magnetization and reduces the value of μ_k . In general, the precise calculation of μ_k is hardly achievable and in the majority of cases the operating value of magnetic permeability is determined experimentally.

In [6] we shall note, that the specified values of magnetic permeability μ_k and the maximal value of ΔB_M , refer to a part of the magnetization characteristic with the greatest pulse tilt. For realization of work on this part of the characteristic, it is necessary to introduce biasing, which leads to additional difficulties connected with an outcome of a winding biasing from an impact of a high pulse voltage, and even with decrease in influence of parasitic parameters.

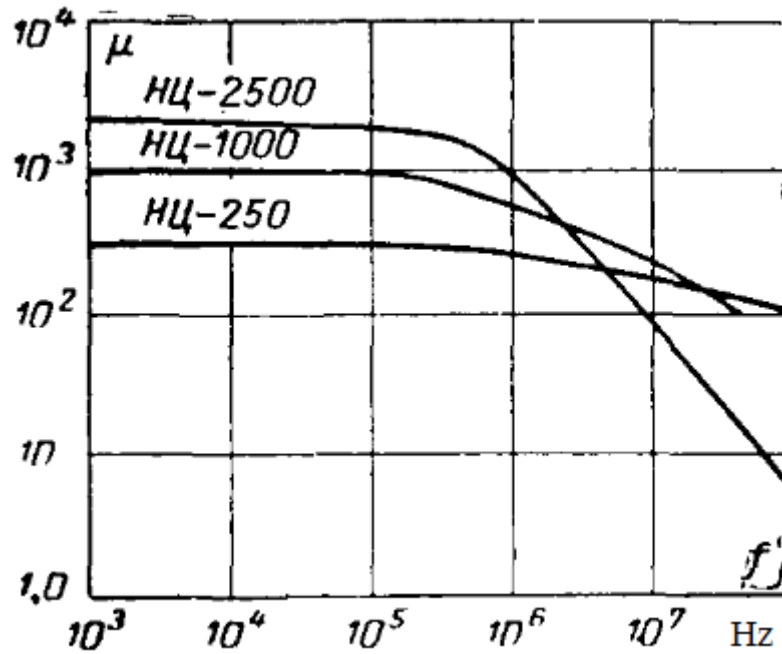
Values of magnetic permeability μ_k and increments of magnetic induction ΔB_M , on a loop of a hysteresis, namely, on its specific cycle, for Permalloys sharply decreases during operation without biasing.

Ferrite materials and their characteristics. From ferrite, the most suitable in the sizes of a ring and physical characteristics is nickel-zinc ferrite. At frequency above gyromagnetic frequency, an electronic spin f_{gr} magnetic permeability of materials from ferrite goes on recession [7-8]:

$$f_{gr} = \frac{g \cdot B_M}{\mu}, \quad (15)$$

Where $g=2 \cdot 10^{10}$ 1/T·sec.

Figure 5 shows the dependence of $\mu = F(f)$ for ferrite materials with various values of μ . Based on curves in the graph it is possible to conclude, that nickel-zinc ferrite with $\mu = 1000$ is the best for cores. The ferrite material of type F1-1000 ($B_M = 0,25$ T, $\mu = 1000$) is identical to this ferrite. Boundary frequency for F1-1000 (the formula 15) is equal to 6 MHz. In case of transformation of an impulse at $\tau_f = 0.2 \cdot \tau_p$ and the top boundary frequency for $\tau_p = 2 \cdot 10^{-7}$ seconds is defined by the formula (16).



Picture A.5 - Dependence of magnetic permeability on frequency

$$f_v = \frac{0,4}{\tau_f} = \frac{0,4}{4 \cdot 10^{-8}} = 10 \text{ MegHz.} \quad (16)$$

Thus, the magnetic permeability is $\mu_v \approx 300$.. The bottom boundary frequency is defined by the formula (17)

$$f_n = \frac{1}{\tau_p} = 5 \text{ MegHz.} \quad (17)$$

μ_n which corresponds to this frequency of approximately 500; the value μ_b is considered during the analysis of transient process at the formation of pulse front. Value μ_n is considered during the analysis of pulse top distortion.

More precise value at the account of additional effects of magnetic influence and etc. is defined experimentally. From calculated values of f_{gr} it follows, that nickel-zinc ferrite is to be used at $\tau_p \geq 10^{-7}$ seconds.

A1.6 Cable Pulse Transformer Construction

The core of a cable pulse transformer will consist of single ferrite rings. To exclude the influence of cracking of rings during winding of a cable, there is a fuller board between the rings. The rings made of isolator material with radius of bending which prevents breaking of a cable are placed on the edge of the core. To reduce isolator distances, the windings are performed with one piece of a cable with consecutive cutting of a braid on sections. And the secondary winding (cable cord) has no break of isolation on all extent. The example of a construction of the pulse transformer with transformation ratio $n=3$ is given in Figure 6. The transformer is designed using ten nickel-zinc ferrite rings 120X80 mm.

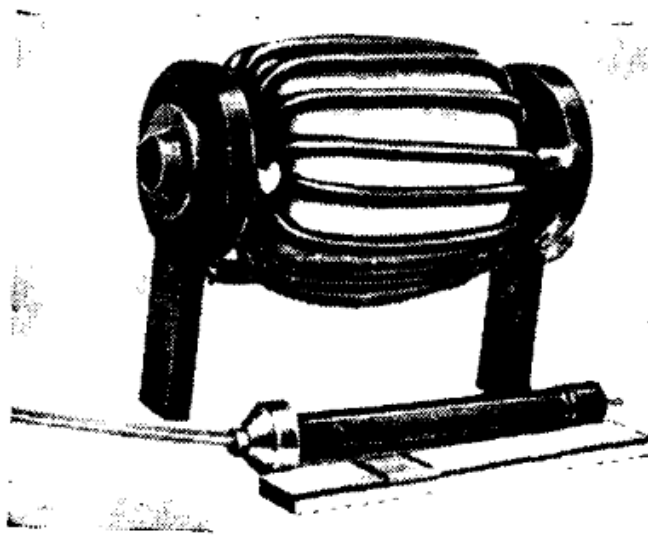


Figure A.6 - Cable pulse transformer with a number of cables $n=3$, power 15 MegWt on a voltage 50 kV, impulse duration of 100 nanoseconds.

For achievement of the minimal dimensions the transformer is fixed on a high-voltage pulse socket made of isolator material.

Conclusion

The use of lasers in various fields of human's activity increases every day.

Lasers are applied in such fields as medicine, heavy industry, atmosphere research, aircraft construction, etc.

Improvement of power supplies of lasers allows reduction of their dimensions, increased efficiency and reduced cost. One of the ways to improve a laser exciter is to install a cable pulse transformer.

The use of a cable pulse transformer in laser equipment is very beneficial from the economic point of view. Moreover, the transformer has small dimensions and it is possible to place it easily in a body of the laser. The efficiency of this source doubles.

References

- 1) Mesjats G.A., Nasibov A.S., Kremnev V.V. Formation of nanosecond high-voltage pulses, M., "Energy", 1970, 155p.
- 2) Nasibov A.S./ Pulse transformer with coaxial cable windings./ « Electricity » №2/ 1965/ p. 26-29.
- 3) Nasibov A.S./ Cable transformer for the formation of high-voltage nanosecond pulses / Preprint №50/ FIAN/ 1967, p. 30-35.
- 4) Yitzhoki Ya.S./ Pulse devices / «Sovetskoye Radio» Publishing House/ 1959, p. 2-9.
- 5) Govorkov V.A., Electric and magnetic fields, 3rd publishing, revised and enlarged M., «Energy», 1968, 488 p.
- 6) Recser G.A./ Now magnetic materials behave at nanosecond pulse width./ Electronics, v. 34/ 1961/ №36/p. 72-75.
- 7) Basov N.G., Ambartsumyan R.V., Zuev V.S., Kryukov P.G., Stoylov Yu.Yu./ Optical quantum generator with pulse switching of Q / ZHETF, t.47/ 1964/ №10/ p. 1595.
- 8) Druzhinin V.V., Magnetic properties of electrical steel, 3rd publishing, revised M., «Energy», 1974, 240 p.
- 9) M.V. Trigub., D.N. Ogorodnikov, V.A. Dimaki. / Research of the metal vapor laser power supply with a pulse charge of service capacity. / « ATMOSPHERIC AND OCEAN OPTICS » 27 / №12/ 2014 year / p. 1-4.
- 10) (GOST - State Standard, Russian National Standard) 11326.4-79; radio-frequency cable, марки RK-50-7-11. technical conditions. Official publishing, 01.01.1981 – Moskow: IPK Standards Publishing House, 2003. – 6 p.
- 11) Electrical strength of materials – [electronic resource: <http://tehtab.ru>] – The open mode of access: (<http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnethism/ElectricalHardnessMaterials>) – The title from the screen. – (Date of the reference: 15.05.2017).
- 13) Ferrite rings – «Magnetron» Factory [electronic resource: <http://www.magnetron.ru>] – The open mode of access: <http://www.magnetron.ru/cat.php?id=134> – The title from the screen. – (Date of the reference: 10.05.2017).